



Étude et calibration d'un hydrophone embarqué sur un flotteur dérivant - application à la sismologie

Cecile Joubert

► To cite this version:

Cecile Joubert. Étude et calibration d'un hydrophone embarqué sur un flotteur dérivant - application à la sismologie. Sciences de la Terre. Université Nice Sophia Antipolis, 2015. Français. NNT : 2015NICE4022 . tel-01359174

HAL Id: tel-01359174

<https://theses.hal.science/tel-01359174>

Submitted on 2 Sep 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ NICE SOPHIA ANTIPOLIS - UFR Sciences

École Doctorale de Sciences Fondamentales et Appliquées

THÈSE

pour obtenir le titre de

Docteur en Sciences

de l'UNIVERSITÉ Nice Sophia Antipolis

Spécialité doctorale : Géophysique

présentée et soutenue par

Cécile JOUBERT

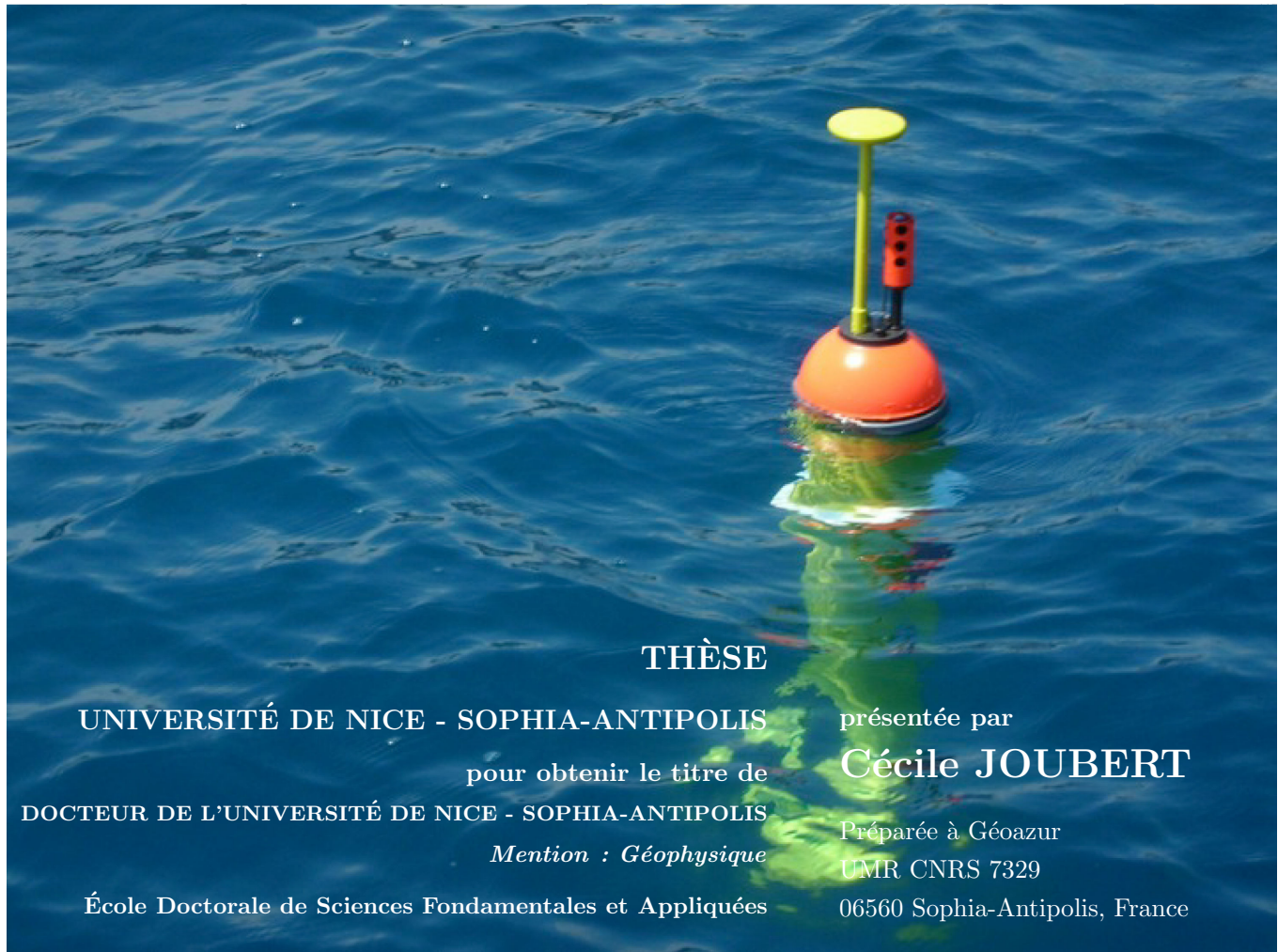
Étude et calibration d'un hydrophone embarqué sur un flotteur dérivant - application à la sismologie

Thèse dirigée par ***Guust NOLET***

soutenance le 18 Mai 2015

Jury :

M. Wayne Crawford,	Rapporteur
Mme. Suzan van der Lee,	Rapporteuse
M. Jean-Xavier Dessa,	Examineur
M. Alexey Sukhovich,	Examineur
Mme. Anne Deschamps,	Co-directrice



THÈSE

UNIVERSITÉ DE NICE - SOPHIA-ANTIPOLIS

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE NICE - SOPHIA-ANTIPOLIS

Mention : Géophysique

École Doctorale de Sciences Fondamentales et Appliquées

présentée par

Cécile JOUBERT

Préparée à Géoazur

UMR CNRS 7329

06560 Sophia-Antipolis, France

Soutenance le 18 Mai 2015

Étude et calibration d'un hydrophone embarqué sur un flotteur dérivant - application à la sismologie

devant le jury composé de :

Wayne Crawford / *Rapporteur*

Suzan van der Lee / *Rapporteuse*

Jean-Xavier Dessa / *Examineur*

Alexey Sukhovich / *Examineur*

Guust Nolet / *Directeur de thèse*

Anne Deschamps / *Co-directrice*

« Face à la roche, le ruisseau l'emporte toujours, non pas par la force, mais par la persévérance. »

Jackson Brown

A Céline

Remerciements

Je tiens à remercier mes directeurs de thèse *Guust Nolet* et *Anne Deschamps*, sans qui ce projet ne serait pas né, pour m’avoir offert l’opportunité de travailler sur ce captivant sujet, en particulier *Guust* pour son aide et ses anecdotes disponibles en toutes circonstances !

Je remercie les rapporteurs et examinateurs de cette thèse : *Wayne Crawford*, *Suzan van der Lee*, *Jean-Xavier Dessa* et *Alexey Sukhovich*, d’avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse, d’avoir relu et amélioré ce manuscrit, qui n’était, pour 75 % d’entre eux, pas rédigé dans leurs langues maternelles ...

Je remercie le centre de radiologie des *Roches Bleues* au Pradet, pour avoir accepté de radiographier mes hydrophones et de l’intérêt qu’ils ont porté à mon travail.

Je remercie *Frédéric Cappa* et *Jean-Hervé Prevost* pour le temps et les conseils qu’ils ont apportés à l’amélioration de mon modèle COMSOL.

Je remercie chaleureusement *Claude Gragnolati* pour son arrivée imprévue dans mon planning de fin de thèse, de son intérêt pour mon travail, de sa disponibilité et de ses conseils.

Je remercie *Alain Anglade* et *Nicolas Mauclet* pour leur disponibilité et aide sur les dessins mécaniques de l’hydrophone.

Je remercie *Guillaume Jamet* et *Jean-Xavier Dessa* pour leurs précieux squelettes LaTeX.

Je remercie *Catherine Briet* de sa gentillesse et d’avoir rendu l’organisation de cette soutenance si facile, dans une période quelque peu stressante.

Je remercie le club de recherche *GLOBALSEIS* pour leurs conseils dans les impasses, *Mickaël, Inna, Suzan, Ebru, Guust, Stéphane* ...

Je remercie *Christophe Maron* et *Inna Slezak* pour leurs disponibilités et leurs aides précieuses sur les données sismologiques.

Je remercie les membres de *Géoazur*, dont le pôle *OBS*, *Anthony*, *Audrey*, *Ben* et *Alain* pour leur gentillesse, aide et soutien. L’équipe de *géologie marine* pour leur bonne humeur et aide notamment lorsque que j’ai découvert la tomographie et la sismologie, *Jean-Xavier*, *Mireille*, *Marie-Odile*, *Laure*, *Marc Régnier* (oui même toi *Marc* :-)) et *Sébastien* pour ses conseils sur la procédure de soutenance

de thèse.

Je remercie *Jean-Xavier*, pour son écoute, soutien et de savoir ramener les choses à leur juste dimension.

Je remercie *Sylvain* « *Sylveine* » pour nos discussions, échanges et son aide en bricolage en tout genre du caisson de calibration.

Je remercie le pôle administratif et informatique de *Géoazur*, *Sandrine*, *Fabienne* « *Marraine la bonne fée* », *Reine* « *Batman* », *Joëlle* « *Jojo* », *Candice* « *Barbie* » ... pour leur gentillesse et bonne humeur quotidienne. Je remercie *Caroline* du pôle informatique pour son aide quand j'ai mis les mains dans le bash, shell, pour *Mamac*, de sa gentillesse et disponibilité, notre petit club de piscine du midi me manquera !

Je remercie également les anciens et actuels thésards, *Flore* « *Florette - Bouboule* », *Adrien* « *Zaza* », *Aurélia* « *Adixia* », *Victorien* « *Vicky* », *Marianne* et *Virginie* « *Toc et Toquée* » et *Rabia*. *Flore* pour son incroyable soutien, d'être telle qu'elle est, une amie, et d'avoir toujours quelque chose à manger dans son bureau ! *Zaza* et *Adixia* de leur gentillesse et de rendre les choses si faciles, « *Tabarnac, Adixia, te rends tu comptes de cette empreinte que je laisse à tout jamais, j'ose dire que je t'aime bien !* », sans compter nos discussions en langue du grand nord, *Tabarnac* ! *Rabia* pour nos comparaisons très instructives entre la recherche, la politique et le football !

Je remercie *Anthony* « *Papy* », *Jenny* « *Cuisses de poulet* » et *Mickaël* qui bien plus que des collègues, sont devenus de véritables amis. *Anthony* pour son soutien et nos interminables discussions sur la « *médecine en informatique de l'électronique au basilic* ». *Jenny* pour son écoute et soutien infailibles et de toutes circonstances, de son aide précieuse sur les données de mes « *biniaux* » et de nos trocs « *une relecture = une tablette de chocolat noir-citron* ». *Mickaël* de m'avoir initiée à la tomographie, de ses conseils, de son temps et aide.

Je remercie également *Jean-François* « *Papy P4* » et *Florent* « *Florentine* » pour leur aide et présence durant la première partie de ma thèse.

Je remercie mes amis, qui me suivent et me soutiennent depuis un nombre d'années que je n'ose écrire ... *Claire* « *Clairrette* », *Estelle* « *Jacky* », *Vincent* « *Pouleto* », *Anne Lise* « *Kékette* », *Léa* « *Léanounette* », *Justine* « *Crustinet* », *Maria* « *Daroca*** », *Céline* « *Fraise tagada* », *Florent* « *Paquito* », *Canelle* « *Canelou* » et *Judith* « *Spopomme* ».

Clairrette pour ses conseils, son soutien et nos inlassables discussions sur la vie. *Pouleto* d'avoir été et d'être là, du temps qu'il a passé à relire mes posters et ébauches d'articles en tout genre ! *Pouleto*, je te dois des burgers à vie ! Le club des « *Nénettes en vadrouille* », avec *Crustinette* et *Maria*, qui malgré les distances Bordeaux - Antibes - Buenos Aires est toujours aussi soudé. *Maria*, de sa gentillesse et de sa bonne humeur. *Crustinette* de son éternel optimisme, de sa joie de vivre

et ses blagues complètement décalées !

Sandrine, Lilian et Bastoch. *Sandrine* d'y avoir cru bien plus que moi, d'être une véritable amie et notre petit havre de paix Varois.

Je remercie ma famille, mon très cher *Papounet*, de son écoute, soutien et réconfort. Il m'a souvent ramenée dans le monde réel et rappelé les choses vraiment essentielles. Merci beaucoup *papa*. J'ai également une pensée pour *Jeannine* et *Bernard*.

Je remercie ma *Céline*, « *Poupoule* », bien plus que ces trois lignes ne pourrons jamais exprimer, de son incroyable et infaillible soutien, de sa présence et aide quotidienne et d'avoir accepté de partager cette aventure doctorale avec moi.

Je remercie également sa famille, *Patricia* et *Stéphanie* pour leurs relectures en toutes circonstances horaires ainsi que papy *Jean* et mamie *Marie* pour leur incroyable gentillesse.

Cette thèse m'a permis d'apprendre sur moi, sur le travail, sur les autres et de faire la rencontre de superbes personnes, merci à tous.

Résumé

Dans ce travail, nous proposons une étude générale des hydrophones, leur fonctionnement suivant le principe de la piézoélectricité, les éléments les constituant ainsi que les brevets et les hydrophones existants. Nous modélisons les courbes de sensibilité à la réception et à l'émission avec le logiciel COMSOL que nous comparons avec des hydrophones en notre possession. Avec ces modèles, nous proposons le design d'un hydrophone potentiel, large bande, viable à de grandes immersions (> 6000 m).

Nous testons deux nouvelles méthodes de calibration d'hydrophone à basses fréquences (< 2 Hz) que nous appliquons aux hydrophones des flotteurs MERMAID. Dans la méthode «dynamique», la réponse de l'hydrophone est étudiée suite à l'application d'une brève surpression (1000 Pa avec $t_\tau < 1$ s), réalisée par le déplacement vertical de l'hydrophone dans l'eau. La méthode «statique» permet d'étudier la réponse du système d'acquisition complet. L'hydrophone est placé dans un caisson étanche dans lequel une surpression est générée par l'ajout d'une colonne d'eau placée au-dessus. Nous déterminons les pôles et zéros de la chaîne d'acquisition des flotteurs. La correction des sismogrammes enregistrés par trois flotteurs MERMAID déployés en mer Méditerranée, nous permet d'estimer la pression générée par le séisme de Barcelonnette à environ 500 Pa (7 avril 2014, $M_w = 4,8$).

Nous validons les données acquises par les MERMAID dans une étude sismologique. Nous étudions les données de six mois d'enregistrements par les trois flotteurs déployés en mer Ligure, développons un protocole de pré-traitement des données que nous validons avec une étude tomographique. En plus des données MERMAID, nous utilisons des stations temporaires de fond de mer et des stations terrestres permanentes. Nous concluons que les temps des arrivées pointés manuellement sur les sismogrammes des données des flotteurs ont, pour 67 % d'entre eux, un écart-type d'environ 0,17 s.

Mots-clefs : Hydrophone, Calibration, Tomographie.

Abstract

In this work, we propose a general study of hydrophones focusing on their operation, based on the piezoelectric principle, the different elements that compose them and the available hydrophones and patents. We model reception and emission sensibility curves with COMSOL software and compare with hydrophones at our disposal, allowing us to qualitatively estimate the sensitivity. We propose a design for a potential broadband hydrophone, viable at large depths (> 6000 m).

We test new methods of hydrophone calibration at low frequencies (< 2 Hz) and apply them to the MERMAID floats hydrophone. In the «dynamic» method, the hydrophone response is studied with a brief pressure variation (1000 Pa with $t_\tau < 1$ s), performed by a winch, which vertically moves the hydrophone into water. The «static» method allows us to study the full system response. The hydrophone is placed in a calibration chamber in which a pressure variation is performed with an additional water column. We have determined poles and zeros applicable to the MERMAID. The correction of seismograms recorded by three MERMAID floats, deployed in the Mediterranean Sea, allows us to estimate the pressure variation produced by the Barcelonnette earthquake which is around 500 Pa (April 7, 2014, $M_w = 4.8$).

We validate the data acquired by the MERMAID in a seismological study. We study data of six months of acquisition of the three floats deployed in the Ligurian Basin, develop a preprocessing method of these data and validate with a tomographic study. In addition to MERMAID data, we used temporary ocean bottom and permanent terrestrials stations. We conclude that onset times picked by eye on MERMAID seismograms have a standard error which is, for 67 % of them, around 0.17 s.

Keywords : Hydrophone, Calibration, Tomography.

Table des matières

Remerciements	ix
Résumé	xiii
Abstract	xv
Abbréviations	xxi
Motivations	1
1 Présentation du flotteur MERMAID	2
2 Présentation du flotteur Multi-MERMAID	8
3 Organisation de la thèse	9
1 Hydrophone	13
Introduction	17
I La piézoélectricité	18
1 La conversion électro-acoustique	18
2 Interprétation cristallographique	18
3 Les équations de la piézoélectricité	22
II Les hydrophones	26
1 Les caractéristiques électro-acoustiques	26
2 Les caractéristiques mécaniques	35
3 Les hydrophones existants	38
III Modélisation avec COMSOL	44
1 Les éléments modélisés	45
2 Proposition d'hydrophone	56
Conclusions et perspectives	66
2 Calibration d'hydrophone à basses fréquences	69
Introduction	73

Table des matières

I	Les méthodes de calibration d'hydrophone	75
1	Dimensionnement d'une cuve de calibration d'hydrophone	75
2	Méthodes de calibration à hautes fréquences	77
3	Méthodes de calibration à basses fréquences	80
II	Développement d'une méthode dynamique de calibration d'hydrophone à basses fréquences	91
1	Protocole expérimental	92
2	Principe mathématique	96
3	Résultats	100
4	Conclusions	101
III	Développement d'une méthode statique de calibration d'hydrophone à basses fréquences	103
1	Protocole expérimental	103
2	Principe mathématique	106
3	Modélisation des pôles et zéros par le programme «polezero»	113
4	Résultats	116
5	Conclusions et discussion	119
	Conclusions	123
3	Test des flotteurs MERMAID en bassin Ligure	127
	Introduction	131
I	Zone d'étude	132
II	Présentation des données	137
1	Campagne océanographique GROSMarin	141
2	Stations terrestres permanentes	146
3	Campagne des flotteurs MERMAID	151
III	Inversion tomographique	165
1	Principe de l'inversion tomographique	165
2	Les étapes de l'inversion tomographique	167
IV	Résultats	169
1	Étude paramétrique	169
2	Tests de résolution	174
3	Solutions	182
	Discussion et perspectives	192
	Conclusions	197
A	Support de l'hydrophone	203

B	Calcul du spectre d'entrée $F(\omega)$	207
C	Hydrophone calibration at very low frequencies	211
D	Programme «polezero»	221
E	Les étapes de l'inversion tomographique	229
	Symboles	235
	Liste des figures	244
	Liste des tableaux	245
	Bibliographie	247

Abbreviations

APEX	A utonomous P rofilng EX plorer
ARGO	A rray for R ealtime G eostrophic O ceanography
AutoDRM	A utomatic D ata R equst M anager
AWI	A lfred W egener I nstitute
BreqFast	B atch r equst F ast
CMT	C entroid M oment T ensor
EIDA	E uropean I ntegrated D ata A rchive
GPS	G lobal P ositionning S ystem
GROSMarin	G rand R éseaux d' O bservations S ous- M arin
HTI	H igh T ech I nc
IBCM	I nternational B athymetric C hart of the M editerranean
IASPEI	I nternational A ssociation of S eismology and P hysics of the E arth's I nterior
Ifremer	I nstitut français de r echerche pour l' e xploitation de la m er
IRD	I nstitut de R echerche pour le D éveloppement
IRIS	I ncorporated R esearch I nstitutions for S eismology
JAMSTEC	J apan A gency for M arine-Earth S cience and T EChnology
LSQR	L east SQ ua R es
LTA	L ong T ime A verage
LTBT	L imited T est B an T reaty
MERMAID	M obile E arthquake R ecorder in M arine A reas by I ndependent D ivers
M30	F lotteurs M ERMAID 30
NBR	N itrile B utadiene R ubber
OBS	O cean B ottom S eismometer
ORFEUS	O bservatories and R esearch F acilities for E Uropean S eismology
ORSTOM	O ffice de la R echerche S cientifique et T echnique O utre- M er
PEM	P arametric E arth M odel
PML	P erfectly M atched L ayer
PSG	P rincton S tandard G rid

Abbréviations

PREM	P reliminary R eference E arth M odel
PVDF	P oly- V inyl- D i- F luoridène
PZT	P lomb Z irconate T itanate
RAP	R éseau A ccélérométrique P ermanent
RéNaSS	R éseau N ational de S urveillance S ismique
RLBP	R éseau L arge B ande P ermanent
SAC	S eismic A nalysis C ode
SLIT	S ystème L inéaire I nvariant dans le T emps
SNR	S ignal to N oise R atio
SOLO	S ounding O ceanographic L agrangian O bserver
SOFAR	S Ound F ixing A nd R anging channel
SRTM	S huttle R adar T opography M ission
STA	S hort T ime A verage
TWR	T eledyne W ebb R esearch
UAL	U nderwater A coustic L aboratory
USGS	U nited S tates G eological S urvey

Motivations

Introduction au projet GLOBALSEIS

La compréhension de la dynamique mantellique est un enjeu majeur en géophysique. La tomographie sismique permet d’imager les structures à différentes échelles dans la Terre. La tomographie globale image des structures allant jusqu’au noyau terrestre. L’hémisphère nord étant majoritairement recouvert de continents, permettant ainsi le déploiement de stations sismologiques terrestres, l’image tomographique globale est relativement bien contrainte. Au contraire, dans l’hémisphère sud, l’importante couverture océanique ne permet pas l’installation de réseaux sismologiques d’aussi grande ampleur, ce qui ampute la résolution de l’image tomographique (Boschi et Dziewonski, 1999). C’est le cas de la thématique de l’étude des points chauds, dont une grande partie se trouve dans l’hémisphère sud. L’utilisation de stations sismologiques de fond de mer (OBS¹) permet de pallier localement à ce problème, mais les études sont restreintes dans l’espace et leur utilisation principale est à des fins de tomographie locale ou régionale.

L’un des objectifs du projet européen GLOBALSEIS (2009-2015, Nolet, 2009) est d’améliorer l’image tomographique grâce au déploiement de flotteurs dérivant appelés «**M**obile **E**arthquake **R**ecorders in **M**arine **A**reas by **I**ndependent **D**ivers» (MERMAID) afin d’enregistrer des ondes sismiques. Ce type de flotteur est couramment utilisé en océanographie. Pour étudier les mouvements des masses océaniques, dans le cadre du projet ARGO² (figure 1, Dalton, 2002, Gould, 2004, <http://www.argo.ucsd.edu/index.html>), près de 4000 flotteurs sont actuellement déployés dans les océans et mers du globe afin de réaliser des profils de salinité et de température.

Le projet GLOBALSEIS utilise le même type de flotteur mais adapté à l’acquisition des ondes télé-sismiques. Après leur conversion en onde acoustique à l’interface eau-sédiment, les ondes générées par des télé-séismes sont enregistrées par un hydrophone. Historiquement, ce projet est né lorsqu’en 2004 un prototype de l’actuel flotteur MERMAID, immergé dans l’océan Pacifique, proche de la

1. Ocean Bottom Seismometer
2. Array for Realtime Geostrophic Oceanography

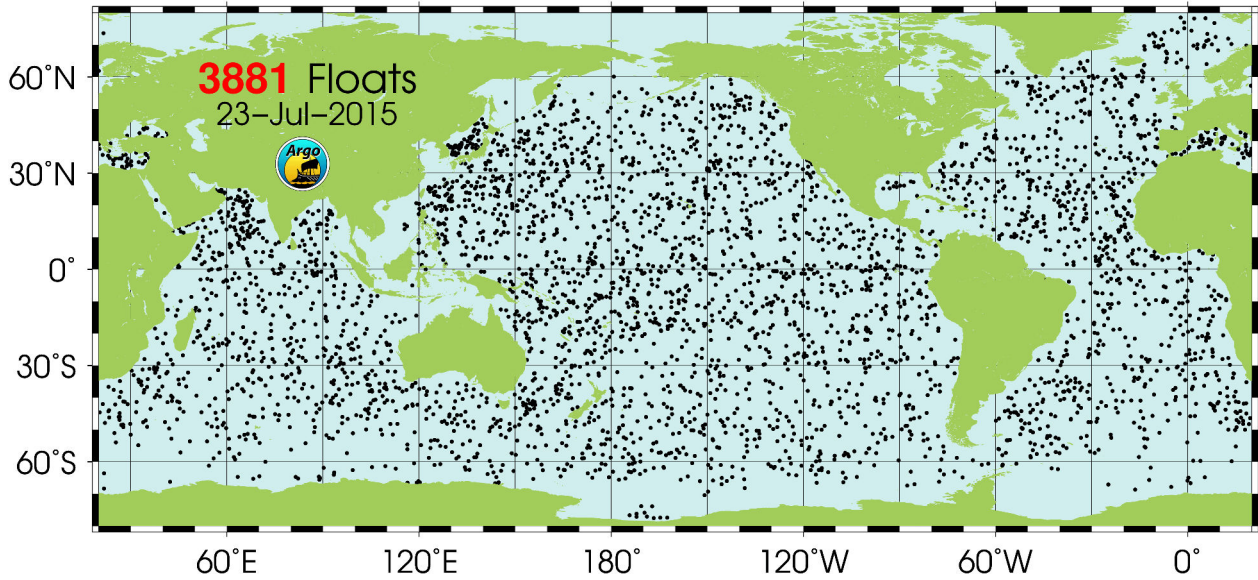


FIGURE 1 – Carte des positions des 3881 flotteurs du projet ARGO déployés au 23 juillet 2015. D’après <http://www.argo.ucsd.edu>.

Californie, a enregistré une onde P d’un séisme en provenance de la côte Colombienne ($M_w = 6$, $\Delta = 46^\circ$) alors qu’il était immergé à 700 m (Simons *et al.*, 2006, Simons *et al.*, 2009). Depuis, des travaux ont permis de rendre le flotteur MERMAID quasiment autonome.

1. Présentation du flotteur MERMAID

a. Présentation mécanique du flotteur

Le flotteur MERMAID est un flotteur lagrangien de type «*APEX*³» commercialisé par la société TWR⁴. Ce flotteur appartient à la famille des flotteurs profileurs, tels que le «*Provor*» développé en partenariat entre l’Ifremer⁵ et la société Martec (<https://www.martec-era.net/>), le «*SOLO*⁶» développé par l’université de Scripps aux Etats-Unis (<https://scripps.ucsd.edu>) et le «*Ninja*» développé par l’entreprise Tsurumi Seiki (<http://tsk-jp.com/tska/>) et l’université de JAMSTEC⁷. Ces flotteurs sont illustrés en figure 2.

Le flotteur APEX que nous utilisons est constitué de trois parties, illustrées en figure 3.

3. Autonomous Profiling EXplorer

4. Teledyne Webb Research, <http://www.webbresearch.com>

5. Institut français de recherche pour l’exploitation de la mer, <http://wwz.ifremer.fr/institut>

6. Sounding Oceanographic Lagrangian Observer

7. Japan Agency for Marine-Earth Science and TEChnology, <http://www.jamstec.go.jp/e/>

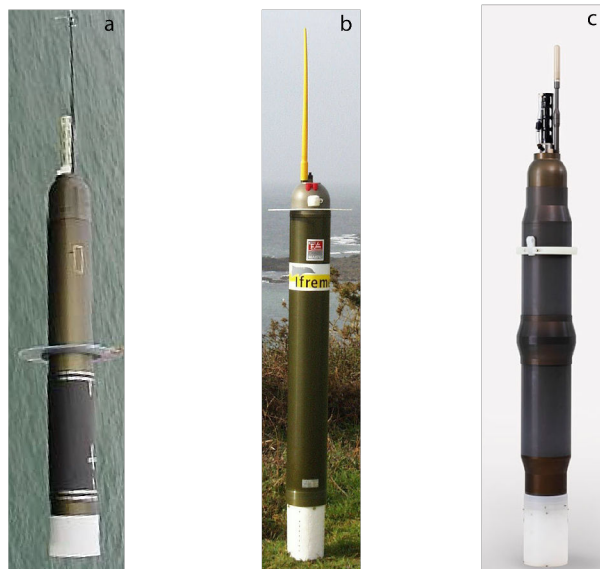


FIGURE 2 – Flotteurs profiteurs dérivant lagrangien : (a) SOLO <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/argo>, (b) Provor <http://www.ifremer.fr/dtmsi/images/produits/flotteur/provor-ct-f/c471128.jpg>, (c) Ninja : <http://www.jamstec.go.jp/ARGO/deepninja/>, en version 4000 m.

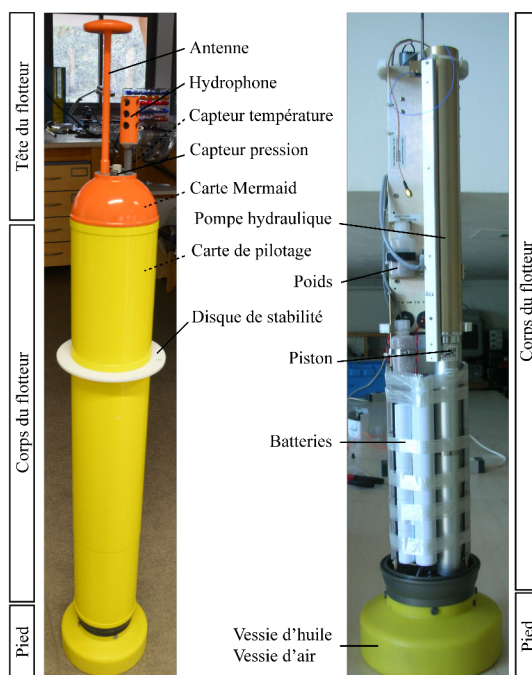


FIGURE 3 – Flotteur APEX - MERMAID : à gauche en vue externe et à droite en vue interne.

La «tête» du flotteur contient la partie scientifique. Elle est constituée de la carte électronique (figure 4), développée pour les besoins spécifiques de l'acquisition des ondes P de ce projet. La

partie externe de la tête du flotteur est constituée d'une antenne combinée permettant d'obtenir la position GPS et la communication par satellite. La tête comprend une sonde de température, une sonde de pression et un hydrophone de type Rafos II (figure 4).

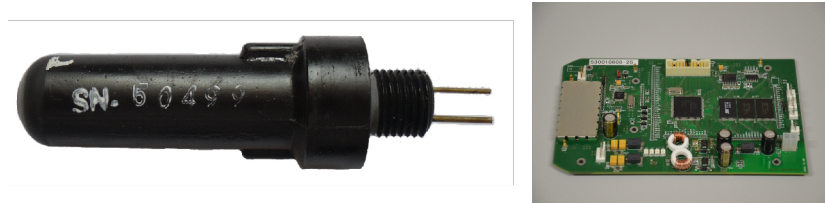


FIGURE 4 – A gauche est représenté d'hydrophone Rafos II et à droite la carte électronique du flotteur MERMAID.

Le «corps» et le «pied» du flotteur contiennent les éléments mécaniques permettant le déplacement du flotteur dans l'eau, son alimentation électrique ainsi que la carte de pilotage. Les mouvements ascendants et descendants sont régis par des variations du volume et donc de la masse volumique du flotteur par rapport à son environnement extérieur. Ils sont contrôlés par un système de pistons et une pompe hydraulique activés par un moteur, régissant un système de type vases communiquant d'huile entre le corps et le pied du flotteur. Lorsque le flotteur est en phase descendante, la majeure partie de l'huile se trouve dans le corps du flotteur, augmentant sa masse volumique et entraînant sa descente. A l'inverse, durant la phase ascendante, cette huile est transférée dans le pied du flotteur, l'allégeant et entraînant ainsi sa remontée vers la surface. La stabilité du flotteur en surface est assurée par une vessie d'air se trouvant dans le pied du flotteur et par un disque de stabilité placé sur le corps du flotteur (figure 3).

Des batteries au lithium permettent d'alimenter les cartes électroniques et les systèmes mécaniques. Un système de poids permet d'ajuster la masse volumique à la référence du constructeur en fonction des éléments ajoutés ou retirés - dans notre cas l'ajout de la carte électronique scientifique.

b. Plongée type du flotteur MERMAID

Le déroulement d'une plongée des flotteurs MERMAID est légèrement différent de celui d'un flotteur du projet ARGO. La figure 5 présente la mission type d'un flotteur MERMAID. Une fois déployé, le fichier de mission contenant les informations d'immersion et de durée est reçu par le flotteur via un satellite. Le flotteur descend à une profondeur dite de «stationnement». L'immersion maximum est contrainte par la résistance mécanique du flotteur et de ses capteurs, en particulier de l'hydrophone (figure 4), avec une immersion maximale de 1732 m. Les flotteurs sont stationnés en moyenne entre 500 et 1500 m afin de limiter l'effet du canal «SOFAR⁸» (canal de propagation des

8. **SO**und **F**ixing **A**nd **R**anging channel

ondes sans perte d'énergie). Dans le cadre des travaux présentés ici, les flotteurs ont été déployés en moyenne à 1514 m de profondeur, avec une immersion minimum de 1446 m et maximum de 1839 m. Le temps moyen de descente du flotteur tel que communiqué par le fabricant est de 8 cm/s. Il faut environ six heures pour atteindre 1500 m de profondeur. En pratique, lors de la remontée d'un flotteur suite à un séisme (voir ci-dessous), le temps de remontée à la surface est d'environ une heure et demie.

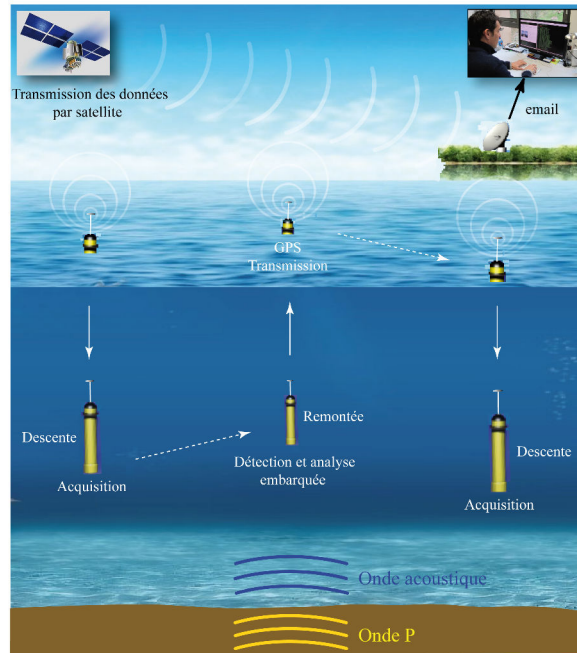


FIGURE 5 – Mission type du flotteur MERMAID. Modifié d'après I. Slezak.

Une fois la profondeur de stationnement atteinte, le flotteur entre en phase de dérive et d'écoute. Il enregistre les signaux acoustiques et réalise une analyse embarquée. A l'enregistrement d'une onde P et en fonction du coefficient de confiance alloué au signal, le flotteur peut, soit remonter à la surface transmettre les données de l'évènement (remontée d'urgence), soit les stocker et les envoyer lors de sa prochaine remontée. Le flotteur peut stocker un maximum de 128 évènements (en moyenne un signal correspond à 20 ko, environ 4 min, et les données sont transmises au satellite par paquet de 100 ko), en conservant les évènements présentant le meilleur indice de confiance. Une fois les données transmises au satellite, le flotteur commence une nouvelle mission. En moyenne, la mission d'un flotteur est d'une dizaine de jours, mais peut être réglée à convenance.

A la différence des plongées des flotteurs ARGO, les flotteurs MERMAID acquièrent des données durant les phases de dérive. Pour les flotteurs ARGO, l'acquisition des profils de température et salinité s'effectue lors de la phase de remontée. Ces flotteurs descendent à 1500 m de profondeur et

dérivent durant quatorze jours en moyenne. A la fin de la phase de dérive, le flotteur entame une deuxième phase de descente de 1500 à 2000 m avant de remonter à la surface. C'est durant la phase de remontée que les profils de température et salinité sont effectués.

c. Acquisition et traitement embarqué

Lors de l'acquisition d'un signal, une analyse embarquée est réalisée afin de déterminer si le signal enregistré correspond à une onde P . Celle-ci est réalisée grâce à un algorithme de discrimination des ondes P téléseismiques, basé sur la transformée en ondelettes et une analyse statistique des signaux (Sukhovich *et al.*, 2011).

La bande de fréquences de l'hydrophone Rafos II (1 Hz - 10 kHz), permet d'enregistrer des signaux autres que des ondes P . L'algorithme réalise une transformée en ondelettes du signal enregistré, dont la représentation fréquentielle s'effectue à l'aide d'un scalogramme, afin de déterminer le type de signal enregistré. Un scalogramme présente la valeur absolue des coefficients de la transformée en ondelettes, caractérisant ainsi la puissance du signal à différentes échelles de fréquences. La figure 6 présente différents types de signaux acquis durant la campagne GROSMarin et susceptibles d'être enregistrés par l'hydrophone Rafos II et leurs scalogrammes associés. Comme nous le voyons, dans le cas de tirs sismiques (figure 6.a), le maximum de la puissance spectrale se trouve dans la deuxième échelle de fréquences, soit entre 5 et 10 Hz. Un moteur de bateau (figure 6.b) a une légère dominante à l'échelle 6, soit entre 0,3 et 0,6 Hz. Une onde T (figure 6.d), présente un maximum aux échelles 3 et 4, soit entre 1,25 et 5 Hz. Une onde P (figure 6.c) présente, quant à elle, une dominante dans les bandes spectrales 5 et 6, soit entre 0,30 et 1,25 Hz, à très basses fréquences.

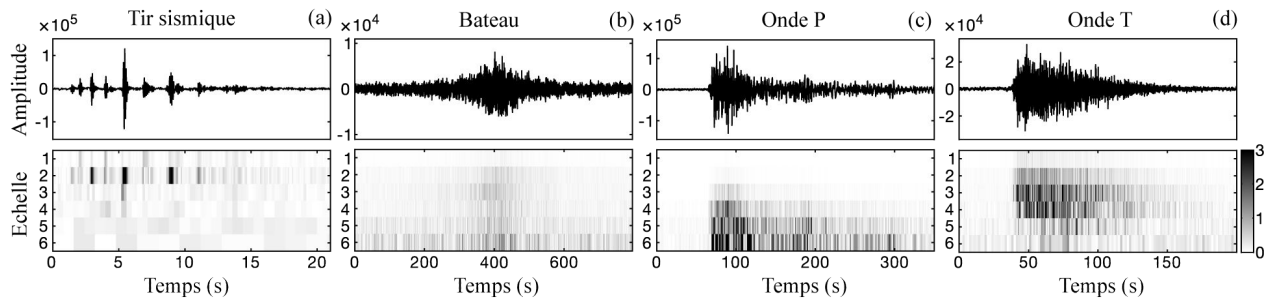


FIGURE 6 – Exemples de signaux et scalogrammes associés enregistrés lors de la campagne GROSMarin (Dessa *et al.*, 2011, Dessa, 2009). Les signaux sont représentés par leurs amplitudes en fonction du temps et les scalogrammes par les échelles de fréquences en fonction du temps. Echelle 1 : 10-20 Hz, échelle 2 : 5-10 Hz, échelle 3 : 2,5-5 Hz, échelle 4 : 1,25-2,5 Hz, échelle 5 : 0,6-1,25 Hz, échelle 6 : 0,3-0,6 Hz. La figure (a) représente le signal et le scalogramme de l'enregistrement d'un canon à air, la figure (b) l'enregistrement du passage d'un bateau, la figure (c) le signal d'une onde P , et la figure (d) le signal d'une onde T . Modifié d'après Sukhovich *et al.*, 2011.

La transformée en ondelettes présente l'avantage de nécessiter moins de temps de calcul que la transformée de Fourier, permettant ainsi une économie des batteries du flotteur.

De manière pratique, lors de l'enregistrement d'un signal, le rapport dit «STA/LTA⁹» du signal est calculé. Une moyenne du bruit ambiant est soustraite puis une analyse statistique est réalisée. La signature spectrale obtenue permet de discriminer le type de signal enregistré (figure 6).

Cet algorithme a fourni d'excellents résultats pour la campagne GROSMarin où il a permis de détecter 94 % des ondes P contenues dans les enregistrements de six mois des OBS et aucune fausse détection n'a été observée (figure 7).

L'algorithme est actuellement utilisé sur les vingt flotteurs MERMAID déployés dans le monde.

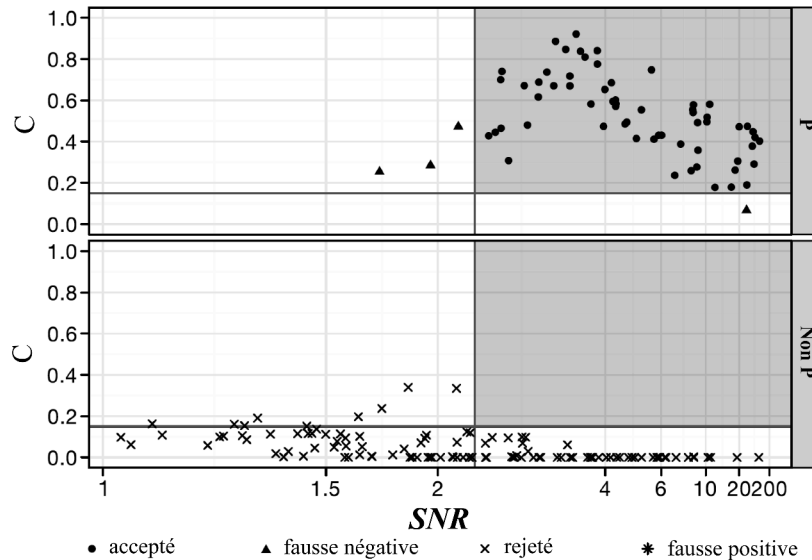


FIGURE 7 – Graphique présentant les résultats de l'algorithme de détection des ondes P (Sukhovich *et al.*, 2011) à partir des données de la campagne GROSMarin (Dessa, 2009 et Dessa *et al.*, 2011). Le graphique en haut présente les signaux d'ondes P téléseismiques et le graphique du bas les autres signaux. L'axe des abscisses présente le rapport signal à bruit (Signal to Noise Ratio) des signaux et l'axe des ordonnées le critère C affecté au signaux. Ce critère permet de quantifier la concordance entre un signal enregistré et le modèle statique utilisé. La combinaison du critère $C = 0,15$ et du rapport signal à bruit $SNR = 2,25$ définissent les zones grises des deux graphiques. Modifié d'après Sukhovich *et al.*, 2011.

Dans le cadre d'une collaboration entre le laboratoire Géoazur et l'entreprise OSEAN, un projet d'évolution du flotteur MERMAID a été mis en place. Il s'agit du projet Multi-MERMAID, qui a pour objectif de développer un nouveau flotteur, permettant d'embarquer des capteurs scientifiques variés, satisfaisant ainsi diverses applications scientifiques.

9. Short Time Average/Long Time Average

2. Présentation du flotteur Multi-MERMAID

L'objectif du projet Multi-MERMAID est de proposer un flotteur (figure 8), sphérique, capable d'embarquer des capteurs scientifiques variés afin de couvrir des domaines d'application divers. En reprenant le même principe de fonctionnement que le flotteur MERMAID, Multi-MERMAID sera capable de descendre à de plus grandes immersions. La version actuelle descend jusqu'à 3000 m, mais il est envisagé une immersion maximale de 6000 m. En comparaison, le flotteur MERMAID descend jusqu'à 1500 m en moyenne et 2000 m pour les flotteurs du projet ARGO. La durée de vie du flotteur sera également plus importante, elle devrait être de 600 cycles, soit de 6 à 8 ans d'autonomie en fonction des capteurs employés, contrairement à 140 cycles, soit environ 1 à 3 ans, pour un flotteur MERMAID.

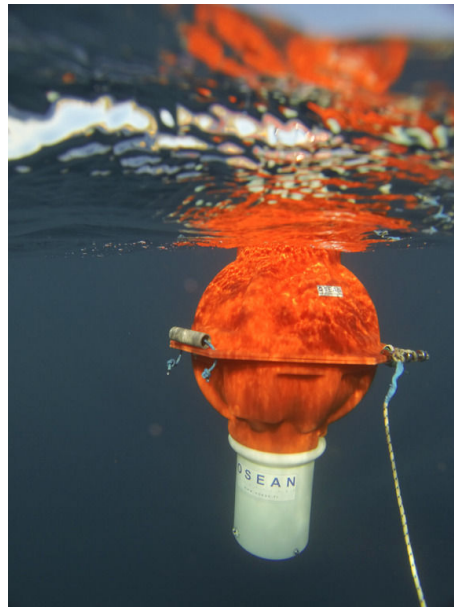


FIGURE 8 – Flotteur Multi-MERMAID. D'après <https://www.geoazur.fr/GLOBALSEIS/LatestNews/index.html>.

Les capteurs embarqués pourront satisfaire des applications scientifiques variées, avec notamment un capteur océanographique de type « Conductivity, Temperature, Depth » (CTD), utilisés sur les flotteurs du projet ARGO. Pour une application acoustique, dans le cadre de cette thèse, nous allons nous intéresser aux hydrophones, notamment à basses fréquences pour une application à la sismologie. L'hydrophone du flotteur MERMAID (Rafos, dont la bande de fréquences est définie par le constructeur entre 1 Hz et 10 kHz, figure 4) enregistre les ondes téléseismiques à très basses fréquences (< 2 Hz). Les applications à ces fréquences, restent relativement peu développées et concernent majoritairement des applications militaires (figure 9). Pour une application pluridisciplinaire, on pourra

s'intéresser aux hydrophones utilisés à plus hautes fréquences. Il est notamment prévu d'utiliser un hydrophone adapté à une application météorologique, soit dans la bande de fréquence de la centaine de hertz à la dizaine de kilohertz.

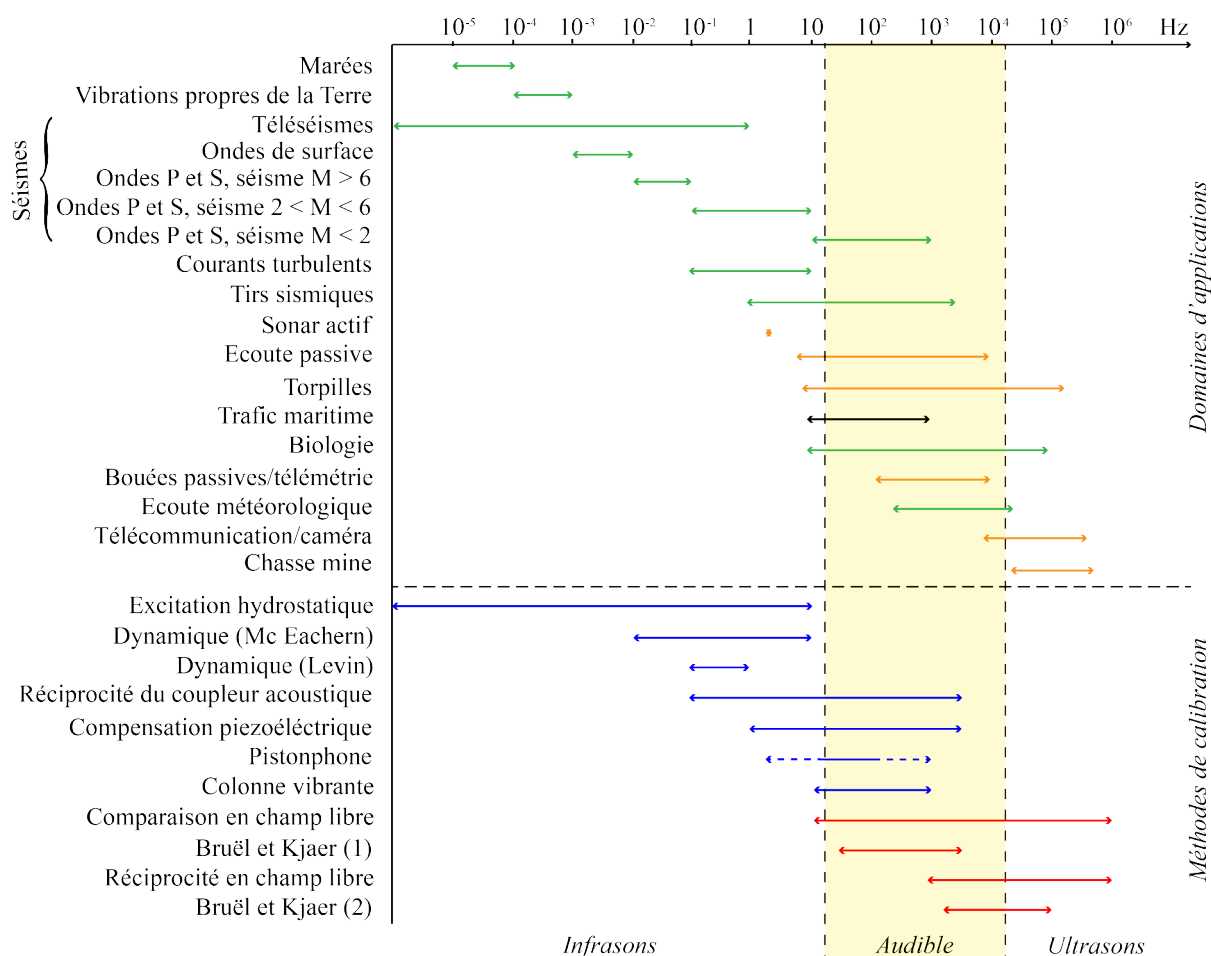


FIGURE 9 – Exemples de domaines scientifiques (vert) et militaires (orange) utilisant des hydrophones pour des applications acoustiques et leurs bandes de fréquences associées. Au-dessous, sont inventoriées les méthodes de calibration associées, à basses fréquences (bleu) et hautes fréquences (rouge). Modifié d'après [Marage et Mori, 2009](#), [Scherbaum, 2001](#).

3. Organisation de la thèse

Ce travail présenté dans cette thèse, dans le cadre d'une collaboration entre le laboratoire Géozur et l'entreprise OSEAN avec un support CIFRE, s'articule autour des différentes étapes d'étude et d'utilisation d'un hydrophone : de sa conception en passant par sa calibration, son déploiement avec acquisition de signaux jusqu'au traitement et à l'interprétation des signaux acquis. La thèse est ainsi structurée en trois chapitres :

- *Hydrophone* : le premier chapitre est consacré à une étude générale sur les hydrophones. Nous étudierons leur fonctionnement, basé sur le principe de la piézoélectricité, les différents éléments qui les constituent ainsi que les principales caractéristiques techniques qui les définissent. Nous ferons un inventaire des brevets d'hydrophones et de ceux disponibles dans le commerce. Dans le cadre du développement d'un nouveau type de flotteur sphérique, Multi-MERMAID, viable à grandes immersions par l'entreprise OSEAN, nous présenterons des modélisations numériques réalisées avec le logiciel COMSOL, dans le but de prédire la principale caractéristique technique d'un hydrophone, sa sensibilité. Nous proposerons ensuite, un schéma d'hydrophone potentiel viable à de grandes immersions.
- *Calibration* : le second chapitre sera consacré à la calibration de l'hydrophone Rafos du flotteur MERMAID. A la différence des hautes fréquences, où des méthodes de calibration sont couramment admises et appliquées, pour les basses fréquences il existe plusieurs méthodes, majoritairement des brevets d'inventions des années 70 à 90 développés à des fins militaires. Nous proposerons le développement de deux méthodes de calibration d'hydrophone à basses fréquences. Une partie de ce travail a été initiée lors d'un stage de Master II. Nous présentons ici la finalisation de cette première méthode, dite «dynamique». Nous avons tiré profit du développement de la carte électronique du flotteur pour proposer une seconde méthode, dite «statique», nous permettant ainsi d'étudier la chaîne complète d'acquisition : l'hydrophone associé à la carte électronique. Nous développerons le principe de cette nouvelle méthode que nous appliquerons aux cas des séismes de Barcelonnette (France, le 07/04/2014, $M_w = 4,8$) et d'Hokkaido (Japon, le 10/08/2014, $M_w = 6,1$) en conclusion.
- *Acquisition, traitement et interprétation* : le troisième chapitre présentera la validation des premières données des flotteurs MERMAID, avec une application à une étude tomographique du bassin Ligure, basée sur les ondes P . Nous présenterons les étapes de pré-traitement nécessaires à la validation et à l'utilisation de ce nouveau type de données. Nous proposerons ensuite une étude de l'influence de l'incorporation de ces données en comparant la résolution des images tomographiques obtenues, à partir de jeux de données de stations terrestres et marines. Enfin, nous comparerons les résultats obtenus avec les études tomographiques de [Piromallo et Morelli, 2003](#) et [Spakman et Wortel, 2004](#).

Chapitre 1

Hydrophone

Sommaire

Introduction	17
I La piézoélectricité	18
1 La conversion électro-acoustique	18
2 Interprétation cristallographique	18
3 Les équations de la piézoélectricité	22
a Les matériaux diélectriques	22
b Les équations de la piézoélectricité	23
II Les hydrophones	26
1 Les caractéristiques électro-acoustiques	26
a La sensibilité	26
i La sensibilité à la réception	26
ii La bande de fréquences	28
iii La sensibilité à l'émission	29
iv La fréquence de résonance	29
b La capacité	29
c La directivité	32
i Principe de la directivité	32
ii La directivité des formes piézoélectriques	34
2 Les caractéristiques mécaniques	35
a L'enveloppe et le remplissage	35
b Les céramiques	38
c La visserie	38
3 Les hydrophones existants	38
a Les hydrophones commercialisés	39
b Les brevets d'hydrophones	41
III Modélisation avec COMSOL	44
1 Les éléments modélisés	45
a La composition minéralogique des céramiques	46
b La sensibilité à l'émission S_v	47
c La sensibilité à la réception S_h	52
d La directivité	54
e Conclusions sur les modélisations	55
2 Proposition d'hydrophone	56
Conclusions et perspectives	66

Introduction

L'enregistrement et l'émission d'ondes en domaine marin se fait par l'intermédiaire de transducteurs. On parle de transducteurs électro-acoustiques dans le cas de la conversion d'une énergie acoustique en énergie électrique et inversement. Le terme de transducteur s'applique à l'émission et à la réception de signaux. A l'émission, on parle plus spécifiquement de projecteur, ce qui correspond à la conversion d'un courant électrique en onde acoustique, par exemple pour de la communication. A la réception, on parle d'hydrophone, ce qui correspond à la conversion d'une onde acoustique en courant électrique, pour de l'écoute. Les projecteurs et hydrophones peuvent être vus comme leurs analogues aériens respectifs d'enceinte et de microphone.

Dans ce chapitre, nous allons principalement nous intéresser aux hydrophones, afin de comprendre leur fonctionnement, basé sur le principe de la piézoélectricité. Nous aborderons les éléments qui les définissent puis nous présenterons brièvement les brevets d'hydrophones ainsi que les hydrophones disponibles dans le commerce.

Nous proposerons ensuite des modélisations réalisées avec le logiciel de simulation multi-physiques COMSOL¹ (version 4.3.b), avec lequel nous avons essayé de reproduire les principales caractéristiques des transducteurs (la sensibilité à l'émission S_v et à la réception S_h), que nous appliquerons notamment, à l'hydrophone des flotteurs MERMAID, le Rafos.

Dans le cadre du développement d'un flotteur sphérique Multi-MERMAID, viable à de grandes immersions par la société OSEAN, nous proposerons et discuterons le schéma mécanique d'un hydrophone étudié avec les modèles construits sous COMSOL et adapté aux contraintes d'une immersion en eaux profondes et à l'acquisition de données télésismiques et météorologiques.

1. <http://www.comsol.com>

I. La piézoélectricité

L'enregistrement des ondes par les hydrophones est possible grâce aux propriétés piézoélectriques du ou des éléments (minéraux, céramique ...) qui les composent. Dans cette partie, nous allons nous intéresser à la propriété de la piézoélectricité et présenter les principaux matériaux associés.

1. La conversion électro-acoustique

L'enregistrement des ondes acoustiques se fait grâce aux propriétés piézoélectriques de certains matériaux (Wilson, 1988 et Brissaud, 2007). La piézoélectricité correspond à la capacité de certains corps à générer un courant électrique sous l'application d'une force mécanique (effet direct, figure 1.1), ou inversement, à se déformer sous l'effet d'un champ électrique (effet inverse). L'effet piézoélectrique direct a été découvert par Pierre et Jacques Curie en 1880 et l'effet piézoélectrique inverse par Lippmann en 1881.

Lorsqu'un élément isolant, diélectrique, entouré par deux électrodes n'est soumis à aucune force, aucune tension n'est enregistrée (figure 1.1.a). Lorsque l'on applique une force P sur l'élément, on enregistre alors une tension aux bornes des électrodes (figure 1.1.b). Dans le cas d'un hydrophone, en réponse à l'arrivée d'une onde, l'élément piézoélectrique va générer une tension électrique.

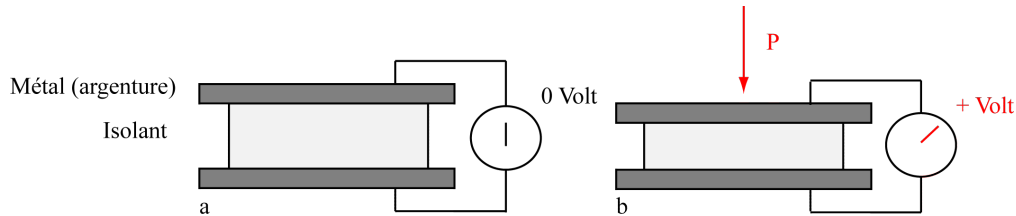


FIGURE 1.1 – Principe de la piézoélectricité. (a) Le corps est à l'équilibre, aucune tension n'est observée. (b) On applique une pression P , le corps se déforme entraînant une tension électrique.

2. Interprétation cristallographique

La propriété de piézoélectricité correspond à l'absence de centre de symétrie d'une molécule, ce qui caractérise l'anisotropie de cette dernière. Par exemple, le quartz (SiO_2 , figure 1.2), est composé d'atomes de silicium, chargés positivement et d'atomes d'oxygène, chargés négativement. En l'absence d'application d'une force, les barycentres des charges positives et négatives sont superposés (figure 1.2.a). Lorsqu'une force est appliquée sur le cristal, les barycentres ne sont plus confondus ce qui entraîne l'apparition d'un moment dipolaire et de charges électriques (figure 1.2.b).

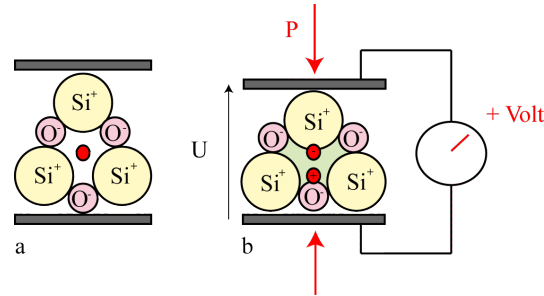


FIGURE 1.2 – Principe de la piézoélectricité appliqué au quartz (SiO_2). (a) Molécule à l'équilibre avec les barycentres des charges négatives et positives confondus. (b) Molécule soumise à une force P entraînant la distinction des barycentres et l'apparition de charges électriques entre les deux électrodes, représentée par la tension U . Modifié d'après [Million, 2003](#).

En plus de la propriété de piézoélectricité, certains corps, notamment ceux utilisés dans la conception d'hydrophones, possèdent des propriétés pyroélectriques (figure 1.3), c'est-à-dire qu'un moment dipolaire permanent existe en l'absence de contrainte (polarisation électrique spontanée). Cette sous-catégorie est divisée en corps ferroélectriques ou non. Pour les corps ferroélectriques, la direction de polarisation du cristal varie en fonction du champ électrique appliqué. Sous l'action de ce champ, la direction de polarisation peut s'inverser (figure 1.4). Les céramiques ferroélectriques, dites «ferrites», résultent de l'assemblage de domaines, qui sous l'application d'un champ électrique vont se réorienter partiellement ou totalement et dont la polarisation peut être conservée, on parle de polarisation rémanente.

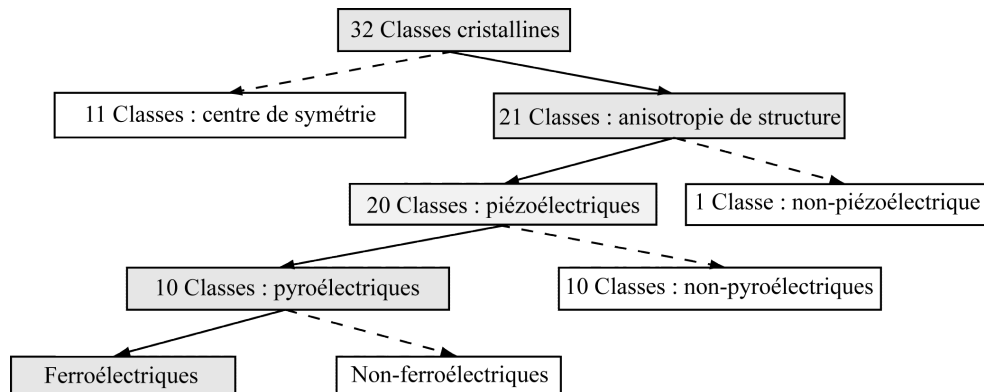


FIGURE 1.3 – Les classes cristallographiques. Modifié d'après [Guiffard, 1999](#).

On retrouve trois grandes familles de matériaux possédant des propriétés piézoélectriques.

Les minéraux

Les minéraux (figure 1.5.a) correspondent, par exemple au quartz, à la tourmaline ou à la topaze.

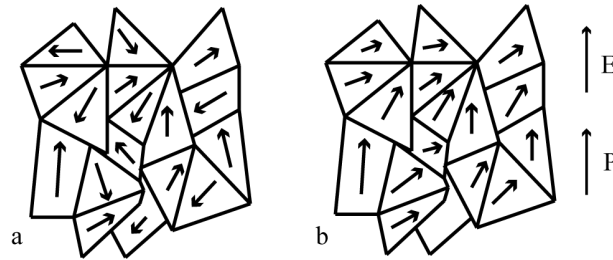


FIGURE 1.4 – Illustration du phénomène de polarisation d'une céramique. (a) La céramique n'est pas polarisée, les directions des polarisations des domaines de la céramique sont différentes. (b) La céramique est polarisée après l'effet d'un champ électrique E . On observe une direction de polarisation préférentielle rémanente P . Modifié d'après [Guiffard, 1999](#).

Des minéraux artificiels ont également été créés, tels que le niobate de lithium ($LiTaO_3$) ou le tantalate de lithium ($LiNbO_3$). Ces matériaux et minéraux sont actuellement peu utilisés, notamment à cause de leur coût élevé, de leur morphologie et du problème de solubilité des minéraux dans l'eau.

Les polymères

Les polymères (figures 1.5 et 1.6) correspondent à un assemblage de macromolécules, dont le plus utilisé est le polyfluorure de vinylidène («polyvinylidifluoridène», PVDF). Il représente un matériel composite en polymère comprenant une phase amorphe avec les propriétés mécaniques et une phase cristalline qui caractérise les propriétés piézoélectriques. Un des avantages de ce nouveau type de matériel est qu'il existe sous forme flexible et solide (figure 1.5.b). Il reste néanmoins encore peu utilisé.

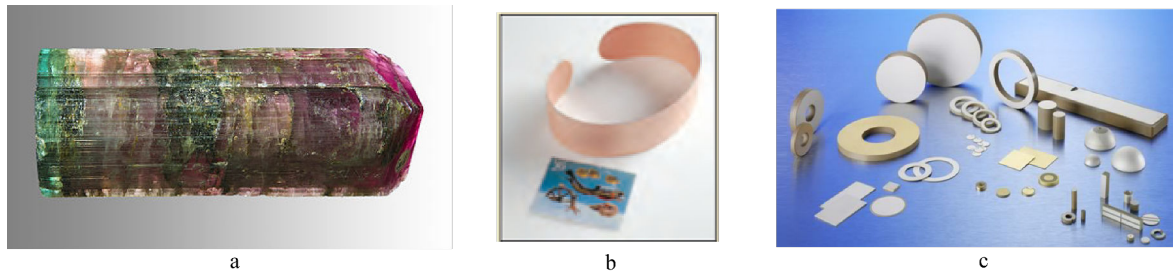


FIGURE 1.5 – Les matériaux piézoélectriques, (a) la tourmaline, (b) le polyfluorure de vinylidène flexible et (c) des céramiques.

Les céramiques

Les céramiques (figures 1.5.c et 1.6) sont couramment utilisées pour la conception de transducteurs. Leur utilisation remonte à plusieurs décennies, notamment pour des applications militaires, d'où leur appellation américaine de «NAVY». Un large panel, de différentes formes (rectangle, cy-

lindre, anneau, disque, sphère, hémisphère ...) et compositions est disponible. Certaines compositions sont plus adaptées aux projecteurs et d'autres aux hydrophones. La composition de céramique la plus couramment utilisée est le Titano-Zirconate de Plomb (PZT, ou LZT² en anglais). D'autres compositions existent, telles que le zirconate de plomb, le titanate de barium et le plomb magnésium niobate.

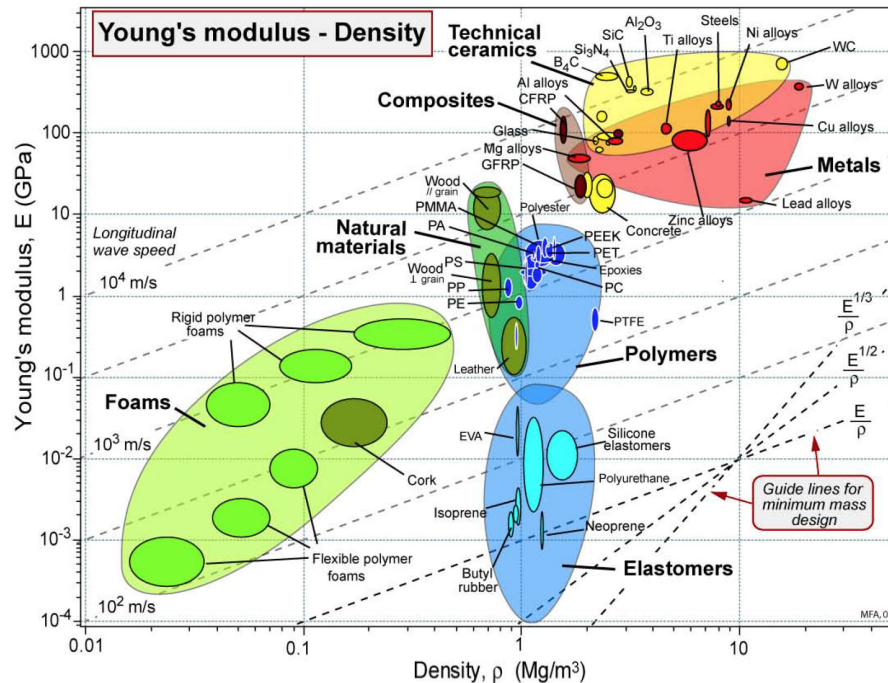


FIGURE 1.6 – Graphique des principaux matériaux en fonction de leurs masses volumiques et leurs modules d'Young. La famille des céramiques est représentée par « Technical ceramics » en jaune. D'après [Embleton, 2011](#) et [Ashby et al., 2009](#).

La fabrication de céramique est un procédé lourd (figure 1.7), elle s'effectue à partir de matériaux solide (poudre) ou liquide. Dans l'industrie la voie solide est privilégiée. En fonction des propriétés souhaitées, les matériaux bruts sont mélangés (Pb, TiO₂, ...) formant une poudre qui est cuite à 900°C. Le résidu de chauffage est ensuite broyé puis comprimé et chauffé une deuxième fois à 600-700°C, ce qui permet une première étape de liage. Une phase de frittage est réalisée à 1200-1300°C permettant d'obtenir la cohésion finale du matériel. La céramique est ensuite polie et les électrodes sont appliquées. Communément, ces dernières sont en argent. La céramique est polarisée pour enregistrer une polarisation rémanente (figure 1.4).

2. Lead Zirconate Titanate

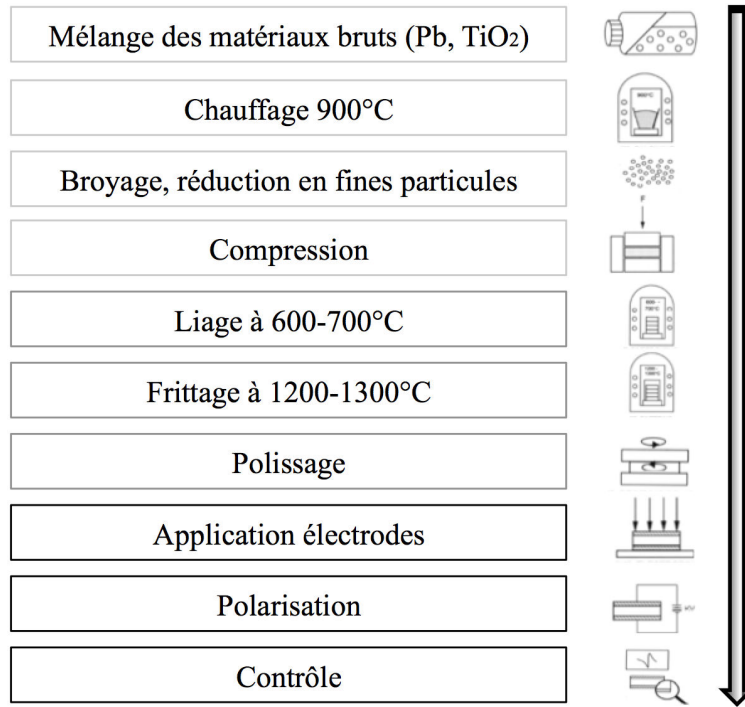


FIGURE 1.7 – Etapes de la fabrication de céramiques piézoélectriques. Modifié d'après <http://www.ferroperm-piezo.com>.

3. Les équations de la piézoélectricité

Intéressons-nous désormais aux grandeurs et équations liées aux matériaux diélectriques et piézoélectriques.

a. Les matériaux diélectriques

Pour les matériaux diélectriques et isotropes, la relation entre le vecteur du champ électrique E et l'induction électrique D est définie par l'équation :

$$D = \epsilon E \quad (1.1)$$

Où ϵ définit la permittivité d'un matériel (Farads/m). En intégrant le vecteur de la polarisation P (C/m^2), on obtient :

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (1.2)$$

Où ϵ_0 est la permittivité du vide (F/m).

b. Les équations de la piézoélectricité

La piézoélectricité exprime le lien entre l'énergie mécanique (contrainte T et déformation S) et électrique (induction électrique D et champ électrique E). Les corps piézoélectriques présentent une anisotropie structurale, leur réponse est fonction de l'orientation, on utilise donc des tenseurs qui caractérisent l'élément dans les trois dimensions de l'espace. Le tableau 1.1 regroupe l'ensemble des grandeurs utilisées en piézoélectricité (Wilson, 1988 et Brissaud, 2007).

Symboles	Définitions	Unités
T	Contrainte	N/m^2
S	Déformation	m/m
E	Champ électrique	V/m
D	Induction électrique	C/m^2
d	Constante piézoélectrique	C/N ou m/V
d^t	Transposée de la matrice d	
g	Constante piézoélectrique	m^2/C
g^t	Transposée de la matrice g	
e	Constante piézoélectrique	C/m^2
e^t	Transposée de la matrice e	
h	Constante piézoélectrique	N/C ou V/m
h^t	Transposée de la matrice h	
s	Souplesse	m^2/N
s^D	Souplesse à induction constante	m^2/N
s^E	Souplesse à champ électrique constant ou nul	m^2/N
c	Rigidité	Pa ou N/m^2
c^D	Rigidité à induction constante	Pa ou N/m^2
c^E	Rigidité à champ électrique constant ou nul	Pa ou N/m^2
ϵ	Permittivité électrique	F/m
ϵ^S	Permittivité avec intervention de la déformation S	F/m
ϵ^T	Permittivité avec intervention de la contrainte T	F/m
β	Constante d'imperméabilité	m/F
β^T	Imperméabilité avec intervention de la contrainte T	m/F
β^S	Imperméabilité avec intervention de la déformation S	m/F

TABLEAU 1.1 – Les grandeurs de la piézoélectricité.

Les équations de la piézoélectricité sont définies par :

$$S = s^E T + d^t E \quad (1.3)$$

$$D = d T + \epsilon^T E \quad (1.4)$$

Lorsque E et S sont indépendantes :

$$T = c^E S - e^t E \quad (1.5)$$

$$D = e S + \epsilon^S E \quad (1.6)$$

Lorsque T et D sont indépendantes :

$$S = s^D T + g^t D \quad (1.7)$$

$$E = -g T + \beta^T D \quad (1.8)$$

Lorsque S et D sont indépendantes :

$$T = c^D S - h^t D \quad (1.9)$$

$$E = -h S + \beta^S D \quad (1.10)$$

Les constantes piézoélectriques permettent de caractériser les matériaux suivant les équations :

- La constante piézoélectrique d caractérise la proportionnalité entre l'induction électrique D et la contrainte T à champ électrique constant ou nul.

$$d = \left. \frac{\partial D}{\partial T} \right|_E \quad (1.11)$$

- La constante piézoélectrique g caractérise la proportionnalité entre le champ électrique E et la contrainte à induction électrique D constante ou nulle. Cette constante hydrostatique est largement utilisée pour définir les caractéristiques des hydrophones.

$$g = - \left. \frac{\partial E}{\partial T} \right|_D \quad (1.12)$$

- La constante piézoélectrique e caractérise la proportionnalité entre l'induction électrique D et la déformation S à champ électrique constant ou nul.

$$e = \left. \frac{\partial D}{\partial S} \right|_E \quad (1.13)$$

- La constante piézoélectrique h caractérise la proportionnalité entre le champ électrique E et la déformation S à induction électrique constante ou nulle.

$$h = - \left. \frac{\partial E}{\partial S} \right|_D \quad (1.14)$$

Les constantes piézoélectriques sont reliées entre elles par les relations suivantes (en appliquant la convention de la sommation définie par Einstein) :

$$d_{mi} = \epsilon_{nm}^T g_{ni} = e_{mj} s_{ji}^E \quad (1.15)$$

$$g_{mi} = \beta_{nm}^T d_{ni} = h_{mj} s_{ji}^D \quad (1.16)$$

$$e_{mi} = \epsilon_{nm}^S h_{ni} = d_{mj} c_{ji}^E \quad (1.17)$$

$$h_{mi} = \beta_{nm}^S e_{ni} = g_{mj} c_{ji}^D \quad (1.18)$$

Avec :

$$\{\beta_{nm}\} = \{\epsilon_{nm}\}^{-1} \quad (1.19)$$

$$\{c_{ij}\} = \{s_{ij}\}^{-1} \quad (1.20)$$

II. Les hydrophones

Maintenant que nous avons vu le principe de la piézoélectricité, sur lequel repose le fonctionnement d'un hydrophone, intéressons-nous aux principales caractéristiques le définissant sur le plan électro-acoustique et mécanique.

1. Les caractéristiques électro-acoustiques

Les hydrophones et projecteurs sont utilisés pour des applications différentes, ils ne se définissent donc pas par les mêmes caractéristiques. Les caractéristiques électro-acoustiques d'un hydrophone sont sa sensibilité à la réception et sa bande de fréquences d'utilisation. Pour un projecteur, il s'agit de sa sensibilité à l'émission et de sa fréquence de résonance. Dans les deux cas, hydrophone et projecteur, on regarde également la capacité et la directivité de l'élément piézoélectrique.

a. La sensibilité

La sensibilité est un paramètre clef caractérisant les réponses des transducteurs. La sensibilité à l'émission définit les projecteurs et la sensibilité à la réception celle des hydrophones. Ces sensibilités permettent de définir la fréquence de résonance et la bande de fréquences d'utilisation des transducteurs.

i. La sensibilité à la réception

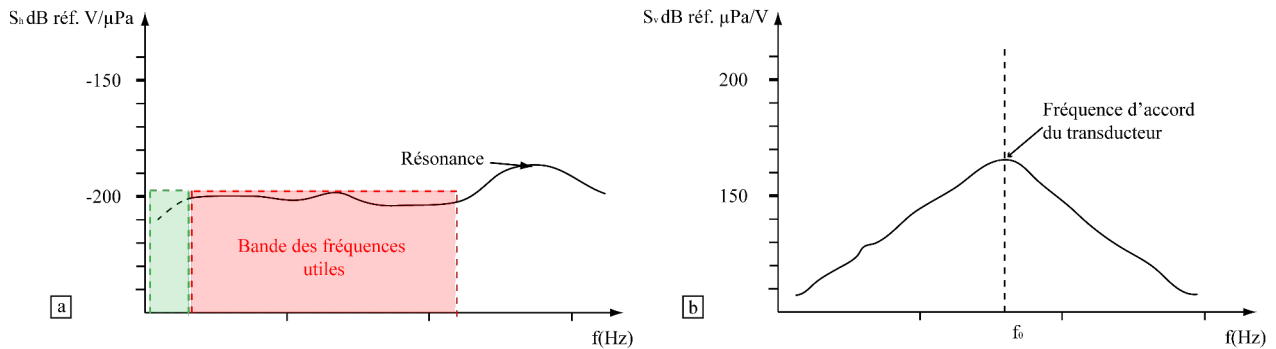


FIGURE 1.8 – Courbes des sensibilités des transducteurs. (a) Courbe type de la sensibilité à la réception d'un hydrophone. (b) Courbe type de la sensibilité à l'émission d'un projecteur. Modifié d'après [Marage et Mori, 2009](#).

La sensibilité à la réception (S_h , figure 1.8) correspond au rapport de la tension U (V) mesurée

en circuit ouvert aux bornes de l'hydrophone avec une pression P (Pa) :

$$S_h = \frac{U}{P} \quad (1.21)$$

Pour une représentation plus aisée, on utilise le décibel (dB) :

$$S_h(dB) = 20 \log \frac{U}{P} \quad (1.22)$$

S_h : sensibilité à la reception (dB réf. V/ μ Pa)

Dans le cas des céramiques tubulaires ou sphériques, les sensibilités peuvent être estimées, en fonction de la polarisation et du type de fermeture (cas des tubes, figure 1.9), par les relations suivantes :

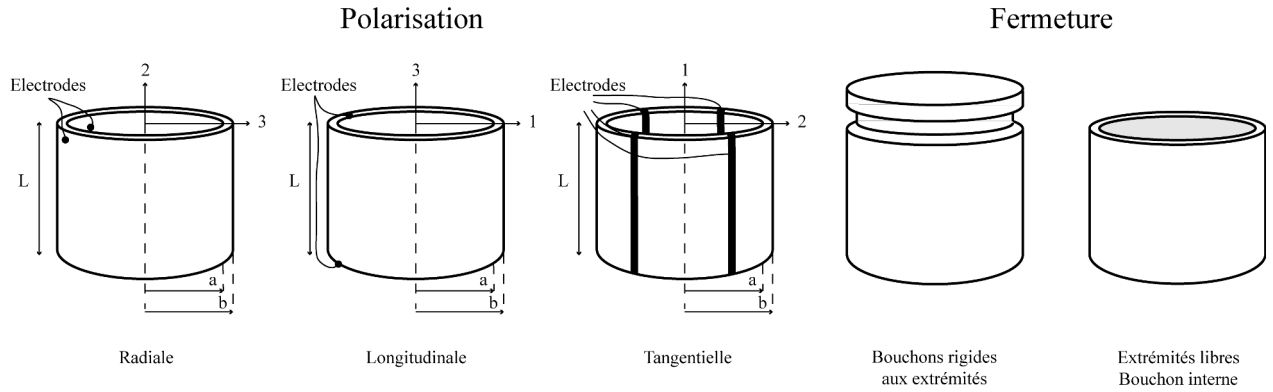


FIGURE 1.9 – Polarisations et types de fermeture de tubes piézoélectriques. Modifié d'après [Leblanc, 1981](#).

Pour une polarisation radiale avec des bouchons rigides externes ou internes, les sensibilités sont respectivement définies par les équations 1.23 et 1.24 :

$$S_{h,externe} = 2b g_{31} \left\{ \frac{1}{2} \left[\frac{(2+\beta)}{(1+\beta)} + \frac{g_{33}}{g_{31}} \frac{(1-\beta)}{(1+\beta)} \right] \right\} \quad (1.23)$$

$$S_{h,interne} = 2b g_{31} \left\{ \frac{1}{2} \left[(2-\beta) + \frac{g_{33}}{g_{31}} \frac{(1-\beta)}{(1+\beta)} \right] \right\} \quad (1.24)$$

Avec $\beta = a/b$, le ratio des rayons interne et externe du cylindre.

Pour une polarisation longitudinale avec des bouchons rigides externes ou internes, les sensibilités sont respectivement définies par les équations 1.25 et 1.26 :

$$S_{h,externe} = L g_{31} \left\{ \frac{2 + \frac{g_{33}}{g_{31}}}{1 - \beta^2} \right\} \quad (1.25)$$

$$S_{h,interne} = L g_{31} \left\{ \frac{2}{1 - \beta^2} + \frac{g_{33}}{g_{31}} \right\} \quad (1.26)$$

Pour une polarisation tangentielle avec des bouchons internes, la sensibilité est définie par l'équation :

$$S_h = \frac{1}{N_s} \frac{2 \pi b}{\ln \left(\frac{1}{\beta} \right)} g_{33} \left\{ 1 + \frac{g_{31}}{g_{33}} (2 + \beta) \frac{(1 - \beta)}{(1 + \beta)} \right\} \quad (1.27)$$

Avec N_s une constante de fréquence de la céramique (Hz m).

La sensibilité d'une sphère polarisée radialement se définit par :

$$S_h = 2 b g_{31} \left\{ \frac{1}{4(1 + \beta + \beta^2)} \left[\frac{g_{31}}{g_{33}} (\beta^2 + \beta - 2) - (\beta^2 + \beta + 4) \right] \right\} \quad (1.28)$$

Avec $\beta = a/b$, le ratio des rayons interne et externe de la sphère.

ii. La bande de fréquences

Les hydrophones sont utilisés pour l'écoute des signaux. Afin d'enregistrer différents types d'ondes, à différentes fréquences, ils se caractérisent souvent par de larges bandes de fréquences (zone en rouge sur la figure 1.8.a). Sur cette gamme de fréquences, on attend une réponse constante de l'hydrophone.

Les courbes de sensibilité de différents types ou marques d'hydrophones possèdent des allures similaires, seuls changent la valeur de la sensibilité, l'intervalle de la bande utile et les valeurs des fréquences de résonance. Sur la figure 1.8.a, on peut observer trois tendances principales :

- *A très basses fréquences (0 à quelques Hz ou kHz en moyenne) :* la sensibilité montre une pente ascendante. La réponse de l'hydrophone à ces fréquences est peu étudiée et/ou non communiquée par le fabricant (zone verte, figure 1.8.a).
- *Au-delà de quelques Hz ou kHz :* on observe une zone de stabilité (zone rouge, figure 1.8.a) où l'application principale est celle des hydrophones en réception car cette zone couvre une large bande de fréquences avec une sensibilité quasi-constante.
- *A plus hautes fréquences :* on rencontre les résonances du matériel piézoélectrique. Les fréquences de résonance sont couramment utilisées en émission (figure 1.8.b), pour la communication par exemple, car le niveau de sensibilité sur une étroite bande de fréquences est meilleure, couramment de plusieurs dizaines de dB.

iii. La sensibilité à l'émission

La sensibilité à l'émission (S_v , figure 1.8.b), utilisée pour définir les projecteurs, représente le rapport entre la pression P (Pa) mesurée sur l'axe d'émission et la tension U (V) appliquée au transducteur :

$$S_v = \frac{P}{U} \quad (1.29)$$

En décibels, on obtient :

$$S_v(dB) = 20 \log \frac{P}{U} \quad (1.30)$$

S_v : sensibilité à l'émission (dB réf. $\mu\text{Pa}/\text{V}$)

iv. La fréquence de résonance

A la différence des hydrophones, les projecteurs sont utilisés sur une étroite bande de fréquences qui correspond à la fréquence propre de la céramique, sa fréquence de résonance. A cette fréquence, la pression envoyée dans la milieu est maximum (figure 1.8.b).

La fréquence de résonance (f_r) est fonction de la géométrie des céramiques. Le tableau 1.2 (Leblanc, 1981) présente les fréquences de résonances pour les formes de disque, de tube et de sphère. La figure 1.10 présente les fréquences de résonance des principales formes de céramiques disponibles sur le marché.

b. La capacité

Une céramique correspond électriquement à un condensateur. Un condensateur se caractérise par un coefficient de proportionnalité entre la charge électrique qu'il peut emmagasiner et la tension électrique appliquée. Cela définit sa capacité. Cette dernière est fonction des formes des céramiques (figure 1.10).

Formes	Mode de vibration	Type de polarisation	Equations
Disque	Epaisseur	Epaisseur	$f_r = \frac{1}{2t} \sqrt{\frac{c_{33}^D}{\rho}}$
	Radiale	Epaisseur	$f_r = \frac{\phi}{2\pi b} \sqrt{\frac{1}{\rho s_{11}^E (1 - \sigma^E)^2}}$ Avec $\phi = (1 - \sigma^E) \frac{J_1(\phi)}{J_0(\phi)}$
	Longueur	Epaisseur	$f_r = \frac{1}{2L \sqrt{\rho s_{33}^E}}$
Cylindre	Radiale	Radiale ou longitudinale	$f_r = \frac{1}{\pi D_m \sqrt{\rho s_{11}^D}}$
		Largeur	$f_r = \frac{1}{\pi D_m \sqrt{\rho s_{33}^D}}$
	Longueur	Radiale ou largeur	$f_r = \frac{1}{2L \sqrt{\rho s_{11}^E}}$
		Longitudinal	$f_r = \frac{1}{2L \sqrt{\rho s_{33}^D}}$
Sphère	Radiale	Radiale	$f_r = \frac{1}{\pi D_m \sqrt{\rho s_P^D}}$

TABLEAU 1.2 – Fréquences de résonance (f_r) en fonction des formes, des modes de vibration et du type de polarisation des céramiques (Leblanc, 1981) Avec t l'épaisseur (m), D_m le diamètre moyen, L la longueur, ρ la masse volumique (kg/m³), σ le coefficient de Poisson et J_1 , J_0 des fonctions de Bessel.

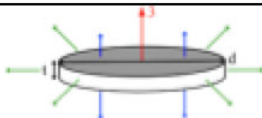

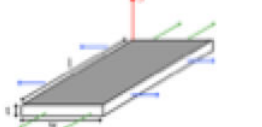

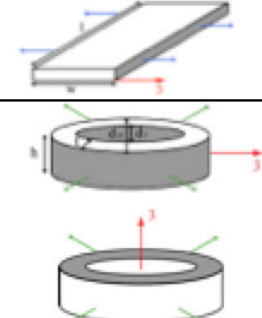
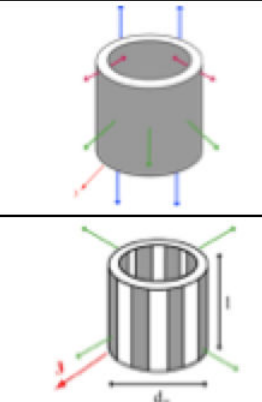
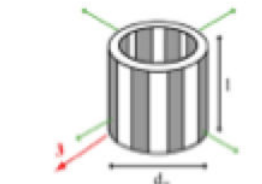
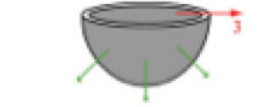
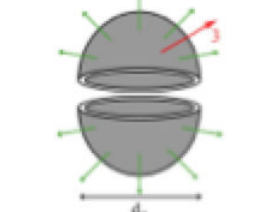
Formes	Géométries	Type de vibration	Dimension	Fréquence de résonnance	Capacité
Disque		Radiale	$d > 5 t$	$\frac{N_r}{d}$	$C = \frac{\pi}{4} K_3^T \epsilon_0 \frac{d^2}{t}$
		Epaisseur	$t < 0,2 d$	$\frac{N_t}{t}$	
Cylindre		Longueur	$l > 3 d$	$\frac{N_{3l}}{l}$	$C = \frac{\pi}{4} K_3^T \epsilon_0 \frac{d^2}{l}$
Parallélépipède		Longueur	$l > 3 w > 3 t$	$\frac{N_1}{l}; f_{rl} = \frac{c}{2l}; f_{rb} = \frac{c}{4l}$	$C = \frac{K_3^T \epsilon_0 l w}{t}$
		Largeur	$3 t < w < 0,3 l$	$\frac{1,06 N_1}{w}$	
		Largeur	$t < 0,2 w$ $t < 0,2 l$	$\frac{N_s}{t}$	$C = K_1^T \epsilon_0 \frac{l w}{t}$
		Largeur	$3 t < w < 0,3 l$	$\frac{N_{3w}}{w}$	$C = K_3^T \epsilon_0 \frac{t l}{w}$
Anneaux		Radiale	$3 t < 3 h < d_o$	$\frac{N_c}{d_m}$ $f_r = \frac{c}{\pi d_m}$	$C = \frac{2\pi K_3^T \epsilon_0 h}{\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}$
				$C = \frac{\pi K_3^T \epsilon_0 (d_o^2 - d_i^2)}{4h}$	
Tube		Radiale	$8 t < d_o$ $0,5 t < l$	$\frac{N_c}{d_m}; f_{rr} = \frac{c}{\pi d}$	$C = \frac{2\pi K_3^T \epsilon_0 l}{\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}$
		Longueur		$\frac{N_1}{l}; f_{rl} = \frac{c}{2l}$	
		Epaisseur		$f_{re} = \frac{c}{2t}$	
		Radiale	$8 t < d_o$	$\frac{N_{3c}}{d_m}$	$C = \frac{K_3^T \epsilon_0 t l n^2}{\pi d_m}$
Hémisphère		Radiale	$8 t < d_o$	$\frac{1,24 N_{sp}}{d_m}$	$C = \frac{\pi}{2} K_3^T \epsilon_0 \frac{d_m^2}{t}$
Sphère		Radiale	$8 t < d_o$ $t \ll d_o$	$\frac{N_{sp}}{d_m}$ $f_r = \sqrt{\frac{1}{2\pi d_o} \frac{2E_{11}}{(1-\sigma)\varphi c}}$	$C = \pi K_3^T \epsilon_0 \frac{d_m^2}{t}$

FIGURE 1.10 – Principales formes de céramiques et formules des résonances associées. Avec d le diamètre, d_i le diamètre interne, d_m le diamètre moyen, d_o le diamètre externe, h la hauteur, l la longueur, t l'épaisseur et w la largeur (m). Les variables N_1 , N_{3c} , N_{3l} , N_{3w} , N_c , N_r , N_s , N_{sp} et N_t sont des constantes de fréquences (Hz m) des éléments piézoélectriques Channel. Ces constantes sont fonction de la forme et de la vibration de l'élément. Les fréquences de résonances sont notées f_r , f_{rl} pour la résonance longitudinale, f_{re} la résonance en épaisseur, f_{rr} la résonance radiale et f_{rb} la résonance d'un parallélépipède vibrant en mode radial, mais bloqué par des bouchons (Hz). C représente la capacité (F), c la vitesse (m/s), φ la masse volumique (kg/m³), σ le coefficient de Poisson. E_{11} , et K_3^T des constantes liées au matériel piézoélectrique. D'après Marage et Mori, 2009, Hajjaji, 2007, Stansfield, 2002, Guiffard, 1999 et la documentation de la société Channel.

c. La directivité

i. Principe de la directivité

La directivité caractérise la valeur de l'intensité générée et observée sur un axe privilégié du transducteur (Marage et Mori, 2009). Elle se définit par l'intensité de rayonnement reçue en un point M à une distance r du transducteur et suivant l'équation :

$$B(\theta, \varphi, r_{fixe}) = \frac{I(\theta, \varphi, r)}{I_{max}(r)} \quad (1.31)$$

r : rayon au point d'observation M (m),

θ : angle entre le plan (XY) et le rayon r (rad),

φ : angle entre l'axe des x et le projeté orthogonal de r sur le plan (XY) (rad),

I_{max} : intensité maximale observée (W/m^2).

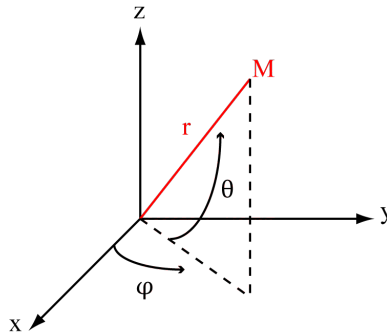


FIGURE 1.11 – Repère utilisé pour la fonction de directivité.

La directivité nécessite une mesure dans toutes les directions de l'espace (figure 1.11). Pour plus de facilité expérimentale, on la mesure dans deux plans particuliers :

Plan (OX, OZ) : on parle de directivité en site

$$B_s(\theta) = b_s(\theta, 0) = \frac{I(\theta, 0, r)}{I_{max}(r)} \quad (1.32)$$

Plan (OX, OY) : on parle de directivité en gisement

$$B_g(\varphi) = b_g\left(\frac{\pi}{2}, \varphi\right) = \frac{I(\frac{\pi}{2}, \varphi, r)}{I_{max}(r)} \quad (1.33)$$

La directivité se représente sous la forme de diagramme polaire (figure 1.12). Dans le cas d'un projecteur, on souhaite souvent envoyer le maximum de l'intensité suivant un axe privilégié, pour

la communication par exemple. Le diagramme polaire présente alors un lobe principal et des lobes secondaires. Au contraire, si on utilise un hydrophone, pour de l'écoute, on souhaite que sa réponse soit identique dans toutes les directions de l'espace, on parle d'hydrophone omnidirectionnel (figure 1.13).

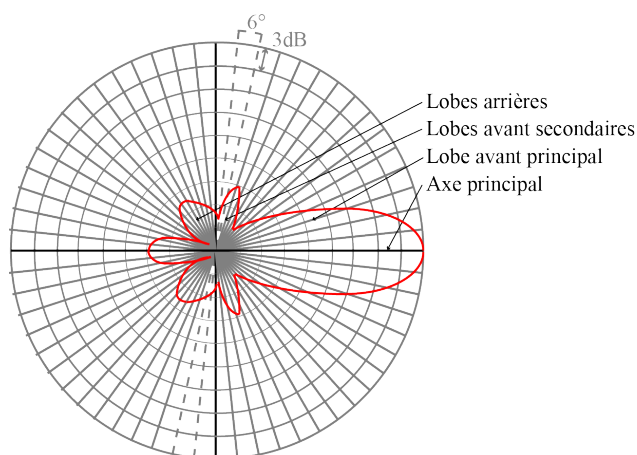


FIGURE 1.12 – Exemple de diagramme de la directivité d'un projecteur.

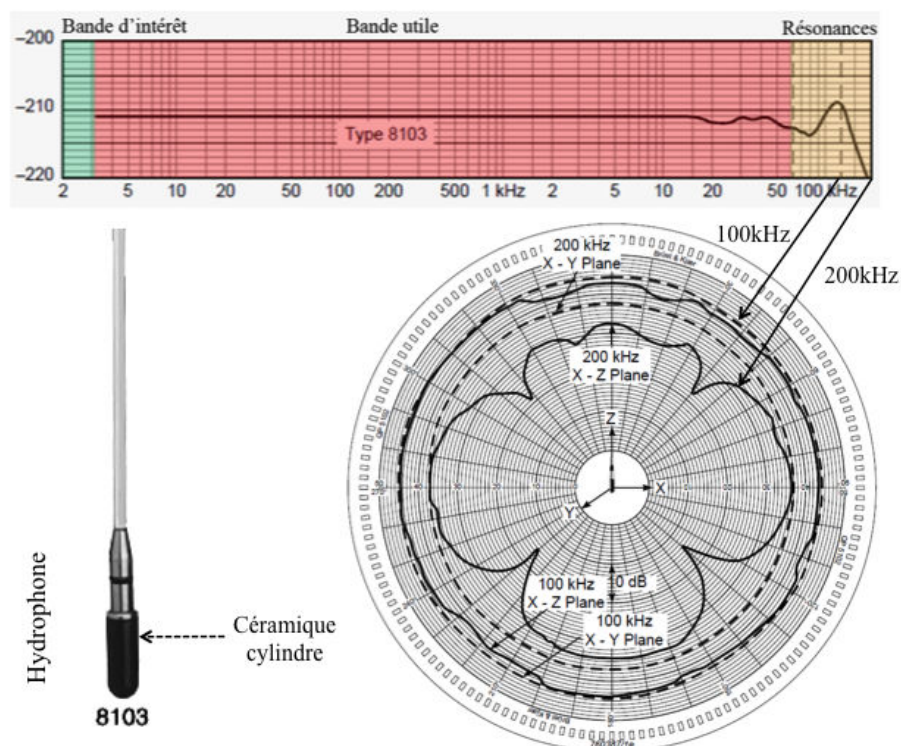


FIGURE 1.13 – Exemple de la directivité et de la sensibilité de l'hydrophone Brüel & Kjaer 8103. Modifié d'après la documentation de Brüel & Kjaer.

Prenons comme exemple l'hydrophone Brüel & Kjaer 8103 (figure 1.13). Sa bande de fréquences

à la réception (bande rouge sur la figure 1.13) est comprise entre 3 Hz et 100 kHz. La directivité, disponible sur sa documentation, est étudiée à 100 kHz et 200 kHz :

- A 100 kHz, l'hydrophone est omnidirectionnel dans le plan (XY) et quasiment dans le plan (XZ) .
- A 200 kHz, la réponse est omnidirectionnelle dans le plan (XY) mais pas dans le plan (XZ) , elle forme quatre lobes.

ii. La directivité des formes piézoélectriques

Les diagrammes de la directivité des formes piézoélectriques courantes peuvent être déterminés avec les équations ci-dessous ([Aide Mémoire d'Acoustique sous-marine, 1968](#) et [Kikuchi, 1969](#)). En pratique, la directivité est principalement représentée suivant l'angle θ . Ces équations sont principalement valables pour les céramiques dont les dimensions sont proches de la longueur d'onde d'étude.

Directivité d'un rectangle

La directivité d'une source rectangulaire est définie par l'équation :

$$B(\theta) = \frac{\sin^2\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta\right)}{\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta\right)^2} \quad (1.34)$$

$B(\theta)$: directivité avec θ l'angle (rad),

λ : longueur d'onde (m),

a : longueur (gisement) ou largeur (site) du rectangle (m).

Directivité d'un anneau

La directivité d'une source annulaire, dans le plan perpendiculaire, est définie par l'équation :

$$B(\theta) = J_0^2\left(\frac{2\pi R}{\lambda} \sin(\theta)\right) \quad (1.35)$$

J_0 : fonction de Bessel de première espèce et d'ordre zéro,

R : rayon de la source (m).

Directivité d'un disque

La directivité d'une source circulaire, dans le plan perpendiculaire, est définie par l'équation :

$$B(\theta) = 4 \left[\frac{J_1\left(\frac{\pi D}{\lambda} \sin(\theta)\right)}{\left(\frac{\pi D}{\lambda} \sin(\theta)\right)} \right]^2 \quad (1.36)$$

J_1 : fonction de Bessel de première espèce et d'ordre un,

D : diamètre de la source (m).

Directivité d'une source cylindrique

La directivité d'une source cylindrique, dans le plan du cylindre, est définie par l'équation :

$$B(\theta) = \left\{ J_0(ka \sin(\theta)) - \frac{J_0(ka \sin(\theta)) - j Y_0(ka \sin(\theta))}{J_1(ka \sin(\theta)) - j Y_1(ka \sin(\theta))} J_1(ka \sin(\theta)) \right\} \frac{\sin(\frac{kl}{2} \cos(\theta))}{\frac{kl}{2} \cos(\theta)} \quad (1.37)$$

Y_0 : fonction de Bessel de deuxième espèce et d'ordre zéro,

Y_1 : fonction de Bessel de deuxième espèce et d'ordre un,

a : rayon (m),

l : hauteur (m),

k : nombre d'onde $k = 2\pi / \lambda$.

2. Les caractéristiques mécaniques

Les principales caractéristiques mécaniques qui définissent un hydrophone sont liées à l'immersion d'utilisation souhaitée. L'immersion définit l'enveloppe externe de l'hydrophone (type, matière, ...). On s'intéresse ensuite à l'élément piézoélectrique (type, forme, composition, ...) et à son remplissage (air, huile, mousse syntactique, ...) toujours en fonction de son enveloppe et donc de son immersion de déploiement.

a. L'enveloppe et le remplissage

Le choix de la matière de l'enveloppe est tout aussi important que le choix de l'élément piézoélectrique. On distingue deux familles d'hydrophone en fonction des immersions souhaitées (figure 1.14).

Immersions intermédiaires ($P < 2000$ m) : les enveloppes sont principalement rigides et en polymère (figure 1.6), souvent du polyuréthane. Ce matériel est coulé autour de l'élément piézoélectrique afin d'éviter toute pré-contrainte. L'élément peut être rempli à l'aide de mousse syntactique ou simplement laissé sans remplissage. Les mousses syntactiques correspondent à des matériaux composites où des microsphères (air ou verre, Choqueuse, 2012) sont injectées sous pression. Ces mousses sont résistantes à la pression et ont une faible masse volumique.

Un exemple d'hydrophone de cette famille est l'hydrophone Rafos, utilisé sur les flotteurs MERMAID et commercialisé par la société Teledyne Benthos (figure 1.15). Il est composé d'une céramique tubulaire sans remplissage et d'une enveloppe en résine.

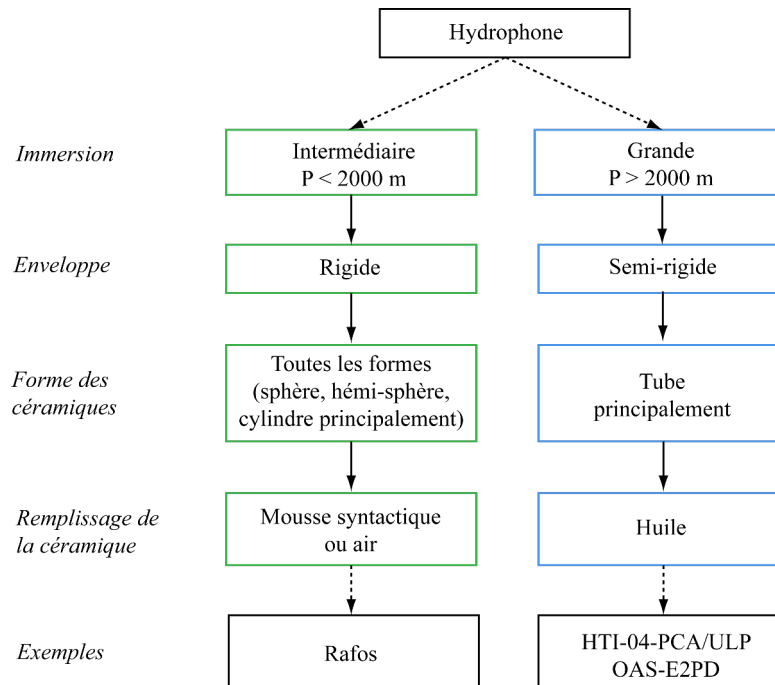


FIGURE 1.14 – Types d'hydrophone en fonction de l'immersion souhaitée.

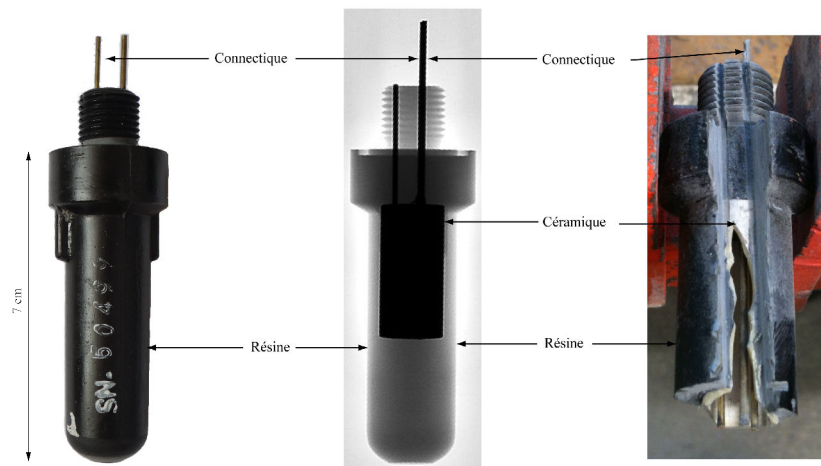


FIGURE 1.15 – Hydrophone Rafos en vue externe, en radiographie et en vue interne.

Grandes immersions ($P > 2000 \text{ m}$) : afin de résister à de fortes pressions, les éléments piézoélectriques sont mis en équipression dans un bain d'huile. L'enveloppe, ou fenêtre acoustique, permet de protéger le capteur et doit être transparente à l'acoustique avec une impédance acoustique proche de celle de l'eau. De tels matériaux correspondent à la famille des élastomères, comme le caoutchouc (figure 1.6).

Les enveloppes utilisées sont semi-rigides, souvent en copolymère butadiène-acrylonitrile. Le NBR³ est couramment utilisé dans l'industrie automobile et pétrolière. Il possède une bonne résistance à la température (-40 à +150°C) et est adapté à une utilisation en eau froide et salée. Les pourcentages de butadiène et de nitrile peuvent être ajustés en fonction des caractéristiques désirées. Un fort pourcentage d'acrylonitrile permet d'obtenir une meilleure résistance à l'huile, une meilleure résistance à l'abrasion et au vieillissement. Un plus faible pourcentage d'acrylonitrile permet une meilleure résistance à la compression et une flexibilité à basses températures.

Les formes de céramiques utilisées sont principalement des tubes (Rogers, 1986). Deux exemples sont illustrés en figure 1.16 pour l'hydrophone OAS-E2PD, qui n'est actuellement plus commercialisé, et en figure 1.17 pour l'hydrophone HTI-04-PCA/ULF commercialisé par la société High Tech Inc.⁴ (HTI). Ces derniers sont utilisés sur les OBS de la campagne GROSMarin⁵ (voir chapitre 3). Ces hydrophones sont composés de trois (OAS-E2PD) ou quatre (HTI-04-PCA/ULF) céramiques tubulaires, maintenues centralement, pour le HTI-04-PCA/ULF et placées dans une enveloppe semi-rigide remplie d'huile. L'intérieur des céramiques est également rempli d'huile.

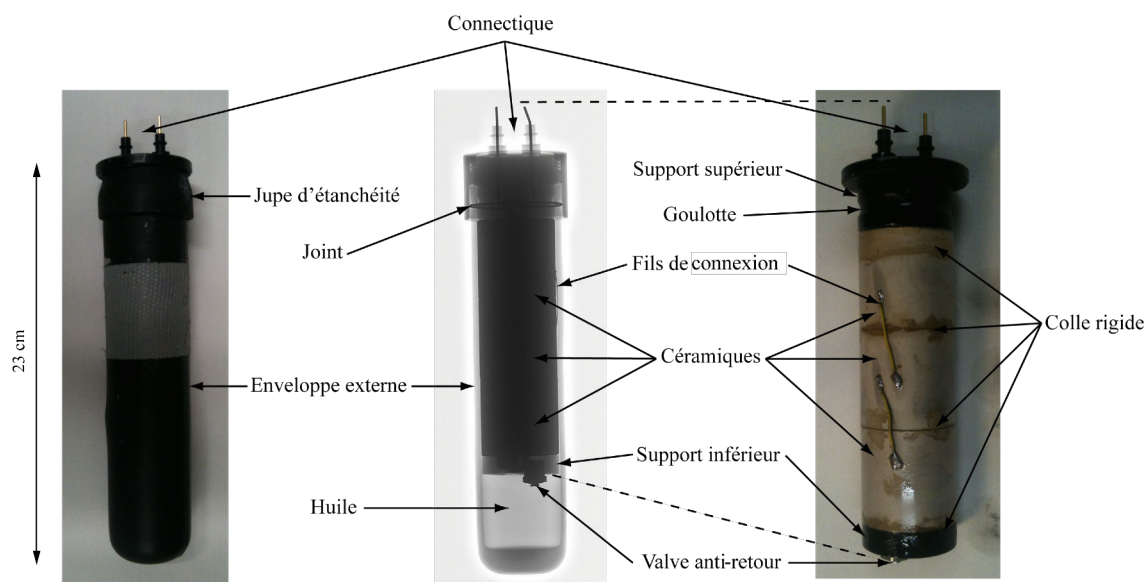


FIGURE 1.16 – Hydrophone OAS-E2PD en vue externe, en radiographie et en vue interne.

3. Nitrile Butadiene Rubber

4. <http://www.hightechincusa.com>

5. Grand Réseaux d'Observations Sous-Marin

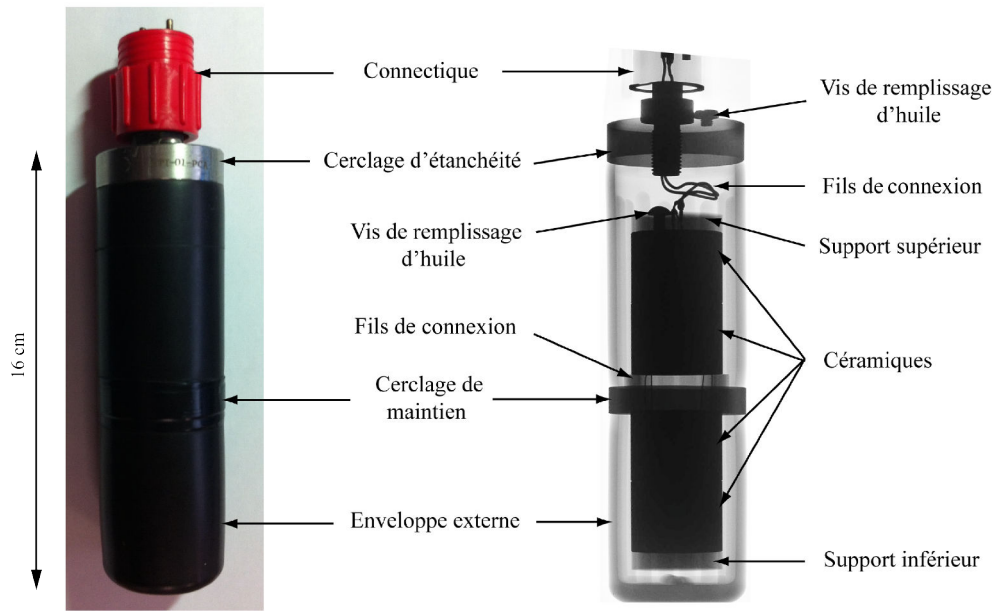


FIGURE 1.17 – Hydrophone HTI-04-PCA/ULF en vue externe et en radiographie.

b. Les céramiques

Les dimensions des céramiques utilisées dans les hydrophones doivent respecter les règles générales de dimensionnement définies dans la figure 1.10. En pratique, à hautes fréquences, la taille optimale d'une céramique correspond au quart de la longueur d'onde d'étude.

c. La visserie

L'hydrophone étant utilisé en milieu marin, il est nécessaire d'avoir des matériaux résistants à la pression et à la corrosion. Des matières comme l'acier inoxydable, le titane et le cupro-aluminium sont privilégiées. Ce dernier est un alliage de cuivre et d'aluminium qui présente une bonne résistance à la corrosion et une bonne dureté. Suivant le mélange et l'adjonction de certains éléments (nickel, fer ou manganèse), les propriétés du cupro-aluminium peuvent être ajustées aux applications souhaitées.

3. Les hydrophones existants

Avant de présenter nos travaux sur les modélisations des caractéristiques électro-mécaniques de transducteurs, intéressons-nous aux hydrophones existants.

a. Les hydrophones commercialisés

Un inventaire des hydrophones présents dans le commerce est disponible en figure 1.18. Nous avons identifié cinq hydrophones dont les caractéristiques correspondent à la bande de fréquences d'intérêt des téléseismes (< 2 Hz) et dont l'utilisation est possible à grande immersion (> 6000 m) : le *TUBA6000* de la société Thales SAFAREPONS⁶, la série des hydrophones *HTI-00-DHPC*, *HTI-02-DHPC*, *HTI-03-DHPC* et l'hydrophone *HTI-04-PCA/ULF* (figure 1.17) de la société High Tech Inc.

6. <http://www.thales-safarepons.com>

Hydrophones	Sh	Sv	Fr	Bande de fréquences		Directivité	Capacité	Céramique	Coque	Immersion	Température	Poids	Dimensions
	dB 1V/μPa	dB μPa/V	kHz	Minimum	Maximum		nF				°C	g	mm
ITC													
ITC-6020	-169	N.C	N.C	0.03 Hz	100 kHz	Omni. à 5 kHz	N.C	N.C	N.C	900	N.C	N.C	Long. 190,5
ITC-6030	-192	N.C	N.C	10 Hz	100 kHz	Omni. à 8 kHz	N.C	N.C	N.C	900	N.C	N.C	Long. 76,20
ITC-6050C	-157	N.C	50	30 Hz	70 kHz	Omni. à 50 kHz	N.C	N.C	Polyuréthane	900	N.C	N.C	Long. 305
ITC-6080C	-154	N.C	N.C	15 Hz	55 kHz	Non omni.	N.C	N.C	Polyuréthane	900	N.C	N.C	N.C
ITC-8073	-167	N.C	55	5 Hz	70 kHz	Non omni. à 50 kHz	N.C	N.C	Polyuréthane	1100	N.C	N.C	Long. 203,20
ITC-8095	-193	N.C	N.C	2 Hz	300 kHz	Non omni. à 100 kHz et 300 kHz	N.C	N.C	N.C	1500	N.C	N.C	Long. 304,80
ITC-8201	-158	N.C	N.C	10 Hz	65 kHz	Non omni. à 50 kHz	N.C	N.C	Polyuréthane	900	N.C	N.C	Long. 381
ITC-8212	-175	N.C	N.C	1 Hz	30 kHz	Omni. à 20 kHz	N.C	N.C	N.C	900	N.C	N.C	Long. 50,8
ITC-1089D	-216	148 à 280 kHz	280	10 Hz	300 kHz	Omni. à 100 kHz	N.C	N.C	Polyuréthane	2000	N.C	N.C	Long. 50,8
ITC-6084	-195	151 à 32 kHz	32	10 Hz	40 kHz	Non omni. à 10 kHz	N.C	N.C	N.C	800	N.C	N.C	Long. 304,8
ITC-6128	-220	139 à 490 kHz	490	100 kHz	700 kHz	Non omni. à 400 kHz	N.C	N.C	Polyuréthane	150	N.C	N.C	Long. 127
ITC-1001	-191	149 à 16,5 kHz	16,5	2 kHz	18 kHz	Omni. à 18 kHz	N.C	NAVY I	N.C	1250	N.C	N.C	Sphère 114,5
ITC-1007	-188	149 à 11,5 kHz	11,5	4 kHz	14 kHz	Omni. à 11,5 kHz	N.C	NAVY I	N.C	1250	N.C	N.C	Sphère 152,4
ITC-1032	-194	N.C	N.C	1 Hz	45 kHz	Omni.	N.C	NAVY I	N.C	1219	N.C	N.C	N.C
ITC-1042	-200	148 à 79 kHz	79	10 Hz	100 kHz	Omni. à 20 kHz	N.C	NAVY I	N.C	1250	N.C	N.C	Sphère 25,4
ITC-1094A	N.C	148 à 169 kHz	169	100 kHz	200 kHz	Non omni. à 180 kHz	N.C	NAVY I	N.C	2000	N.C	N.C	Sphère 25,4
ITC-4004A	-156	135 à 2,4 kHz	2,4	2,15 kHz	2,65 kHz	N.C	N.C	NAVY I	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
ITC-4008A	N.C	148 à 5,5 kHz	5,5	N.C	N.C	Omni. à 5 kHz	N.C	NAVY I	N.C	180	N.C	N.C	Sphère de 330,2
Teledyne Reson													
TC4013	-211	130 à 100 kHz	100	1 Hz	170 kHz	Omni. à 100 kHz	3,4	N.C	NBR	700	-2 à +80	75	Long. 63
TC4033	-2034 - 250	144 à 100 kHz	90	1 Hz	140 kHz	Hori. omni. à 100 kHz / Vert. non omni. à 100 kHz	6,6	N.C	NBR	900	-2 à +80	1500 av. 10 m de câble	Long. 138 / Diam. c.a. 25
TC4014	-180 à -186	N.C	N.C	15 Hz	480 kHz	Hori. omni. à 100 kHz / Vert. non omni. à 100 kHz	1,7	N.C	NBR	900	-2 à +55	650 sans câble	Long. 272,5 / Diam. c.a. 16
TC4032	-170	N.C	N.C	5 Hz	120 kHz	Hori. omni. à 100 kHz / Vert. non omni. à 15 kHz	0,17	N.C	NBR	600	-2 à +55	720 sans câble	Long. 284,5 / Diam. c.a. 24
TC4034	-218	122 à 100 kHz	300	1 Hz	470 kHz	Hori. omni. / Vert. non omni. à 300 kHz	1,7	N.C	NBR	900	-2 à +80	1600 av. 10 m de câble	Long. 138 / Diam. c.a. 11
TC4035	-214	N.C	N.C	100 kHz	500 kHz	Hori. omni. / Vert. non omni. à 250 kHz	0,4	N.C	Polyuréthane	300	-2 à +40	410 av. LEMO receptacle	Long. 169,5 / Diam. c.a. 4
TC4037	-193	N.C	N.C	1 Hz	100 kHz	Hori. omni. / Vert. non omni. à 40 kHz	2 à 4,5	N.C	NBR	1500	-2 à +55	86	Sphère 36
TC4038	-228	N.C	780	10 kHz	800 kHz	Hori. omni. / Vert. non omni. à 100 KHz	N.C	N.C	Polyuréthane	20	-2 à +40	20	Long. 58 / Diam. c.a. 4
TC4040	-206	132 à 50 kHz	80	1 Hz	120 kHz	Hori. omni. / Vert. non omni. à 50 kHz	8,3	N.C	NBR	400	-2 à +80	1600 av. 10 m de câble	Long. 116 / Diam. c.a. 21
TC4042	-173	N.C	N.C	5 Hz	85 kHz	Hori. omni. à 40 kHz / Vert. non omni. à 40 kHz	2 à 4,8	N.C	NBR	1000	-2 à +55	450	Long. 220 / Diam. c.a. 36
Bruel & Kjaer													
8103	-211	N.C	N.C	0.1 Hz	180 kHz	Omni. à 100 kHz / Vert. non omni. à 200 kHz	3,85*	N.C	Polyuréthane	1000	-30 à +80	170 av. 6 m de câble	Long. 50 / Diam. 9,5
8104	-205	N.C	N.C	0.1 Hz	120 kHz	Vert. non omni. à 125 kHz / Omni. à 50 kHz	7,80*	N.C	Polyuréthane	1000	-30 à +80	1600 av. 10 m de câble	Long. 120 / Diam. 21
8105	-205	N.C	N.C	0.1 Hz	160 kHz	Omni. à 50 kHz / Non vert. omni. à 150 kHz	7,50*	N.C	Polyuréthane	1000	-30 à +80	1600 av. 10 m de câble	Long. 93 / Diam. 22
8106	-174	N.C	N.C	7 Hz	80 kHz	Omni. à 20 kHz / Vert. non omni. à 100 kHz	N.C	N.C	Polyuréthane	1000	-30 à +60	382	Long. 182 / Diam. 32
Benthos Waves													
BU1-7001	-204,8	N.C	N.C	1 Hz	180 kHz	Hori. omni. à 120 kHz / Vert. non omni. à 120 kHz	6,3	N.C	N.C	500	-10 à +60	35 av. 1 m de câble	Sphère 25,4
BU1-7002	-207,2	N.C	N.C	2 Hz	210 kHz	Hori. omni. à 140 kHz / Vert. non omni. à 140 kHz	5,2	N.C	N.C	2500	-10 à +60	95	Sphère 25,4
BU1-7006	-204,8	N.C	N.C	3 Hz	150 kHz	Hori. omni. à 120 kHz / Vert. non omni. à 120 kHz	N.C	N.C	N.C	500	-10 à +60	176	Long. 80 / Diam. 25,4
BU1-7007	-207,2	N.C	N.C	4 Hz	180 kHz	Hori. omni. à 140 kHz / Vert. non omni. à 140 kHz	N.C	N.C	N.C	2500	-10 à +60	178	Long. 80 / Diam. 25,4
Thales Ponc													
SHYRENE	-179	N.C	N.C	5 Hz	15 kHz	Hori. omni. à 15 Hz / Vert. omni. à 15 Hz	N.C	N.C	N.C	350	N.C	390 sans câble	N.C
TUBA 3000	-200	N.C	N.C	5Hz	20 KHz	N.C	1,8	N.C	N.C	350	N.C	11	Long. 46 / Diam. 12
TUBA 6000	-193	N.C	N.C	0 Hz	15 kHz	Omni.	2	N.C	N.C	6000	N.C	260	Long. 90 / Diam. 32
Cetacean Research													
CR 1	-198	N.C	N.C	0,2 Hz	48 kHz	Omni. < 10 kHz	10	N.C	Polyuréthane	100	-25 à +60	N.C	Long. 73 / Diam. 32 / Câble 15 m
CR 2	-214	N.C	N.C	2 Hz	28 kHz	Omni. < 10 kHz	0,82	N.C	Polyuréthane	460	-40 à +70	N.C	Long. 56 / Diam. 14 / Câble 10 m
CR 3	-210	N.C	N.C	0,4 Hz	77 kHz	Omni.	4	N.C	N.C	250	-40 à +90	N.C	Long. 50 / Diam. 18 / Câble 15 m
C35	-185	N.C	N.C	15 Hz	44 kHz	Omni. < 10 kHz	N.C	N.C	Polyuréthane	460	-40 à +60	N.C	Long. 119 / Diam. 16 à 25
C35RS	-200	N.C	N.C	15 Hz	50 kHz	Omni. < 10 kHz	N.C	N.C	Polyuréthane	460	-40 à +60	N.C	Long. 119 / Diam. 16 à 25
C35RS	-200	N.C	N.C	124 kHz	250 kHz	Omni. < 10 kHz	N.C	N.C	Polyuréthane	460	-40 à +60	N.C	Long. 119 / Diam. 16 à 25
C35XN	-185	N.C	N.C	15 Hz	44 kHz	Omni. < 10 kHz	N.C	N.C	Polyuréthane	460	-40 à +60	N.C	Long. 119 / Diam. 16 à 25
C56	-185	N.C	N.C	20 Hz	44 kHz	N.C	N.C	N.C	Polyuréthane	460	-40 à +60	N.C	Long. 130 / Diam. 25
C75	-206	N.C	N.C	10 Hz	85 kHz	Omni.	N.C	N.C	N.C	250	-40 à +85	N.C	Long. 101 / Diam. 18 à 25
SQ26-VR	-194	N.C	N.C	20 Hz	20 kHz	Omni. < 10 kHz	N.C	N.C	N.C	100	-25 à +60	N.C	Long. 70 / Diam. 32 / Câble 10 m ou 30 m
SQ26-01	-193,5	N.C	N.C	10 Hz	28 kHz	N.C	1,4	N.C	N.C	2000	-30 à +60	16 g	Long. 24,5 / Diam. 25,4
C304	-201	N.C	N.C	12 Hz	250 kHz	Omni. à 10 kHz	N.C	N.C	N.C	460	-40 à +60	N.C	Long. 83 / Diam. 6 à 25
C304XR	-201	N.C	N.C	13 Hz	1 000 kHz	Omni. à 10 kHz	N.C	N.C	N.C	460	-40 à +60	N.C	Long. 83 / Diam. 6 à 25
SensorTech													
SQ01	-193,5	N.C	N.C	1 Hz	5 kHz	N.C	31	N.C	Polyuréthane	1000	N.C	75 sans câble	Long. 95,2 / Diam. 30,7
SQ03	-164	N.C	N.C	10 kHz	65 kHz	N.C	N.C	N.C	N.C	650	N.C	250 sans câble	Long. 180 / Diam. 25,4
SQ31	-148	N.C	N.C	10 kHz	65 kHz	N.C	N.C	N.C	N.C	650	N.C	384	Long. 196,8 / Diam. 25,4
SQ48	-165	N.C	N.C	25 Hz	400 kHz	Omni.	N.C	N.C	N.C	3500	N.C	250 sans câble	Long. 304,8 / Diam. 48
SQ42	-170	N.C	N.C	1 Hz	350 kHz	Omni.	N.C	N.C	N.C	3500	N.C	980 sans câble	Long. 279,4 / Diam. 38
SQ52	-216	N.C	N.C	2 Hz	300 kHz	Omni.	2	N.C	N.C	2000	N.C	50 sans câble	Long. 70 / Diam. 12,7
SQ05	-204,5	N.C	N.C	1 Hz	15 kHz	N.C	4,8	N.C	Polyuréthane	3500	N.C	15	Long. 51 / Diam. 12,7
SQ06	-201,5	N.C	N.C	3 Hz	30 kHz	N.C	1	N.C	Polyuréthane	3500	N.C	16	Long. 33 / Diam. 16,5
SQ26	-193,5	N.C	N.C	1 Hz	28 kHz	N.C	1,4	N.C	Polyuréthane	2000	N.C	16	Long. 25,4 / Diam. 25,4
SQ34	-201,5	N.C	N.C	1 Hz	5 kHz	N.C	14,5	N.C	Polyuréthane	2000	N.C	17	Long. 52,3 / Diam. 15,8
SQ09	-192	N.C	N.C	3 Hz	20 kHz	N.C	10	N.C	N.C	2500	-30 à +60	285	Long. 63,5 / Diam. 50,8
SQ13	-193	N.C	N.C	2 Hz	3 kHz	N.C	4,5	N.C	N.C	4000	N.C	285	Long. 63,5 / Diam. 73,6
SQ21	-191	N.C	N.C	1 Hz	8 kHz	N.C	2	N.C	N.C	1000	N.C	60	Long. 69,9 / Diam. 30
Neptune													
D/60	-190	145	60	10 Hz	90 kHz	Omni. < 70 kHz	9,8	PZT	Polyuréthane	1500	-5 à +40	N.C	Long. 85 / Sphère 42
D/70	-190	148	70	10 Hz	100 kHz	Omni. < 80 kHz	9,3	PZT	Polyuréthane	1500	-5 à +40	N.C	Long. 75 / Sphère 34
D/140	-210	150	150	20 Hz	170 kHz	Omni. < 160 kHz	3,5	PZT	Polyuréthane	1500	-5 à +40	N.C	Long. 65 / Sphère 20
B/200	-212	145	270	10 Hz	180 kHz	Vert. omni. à 100 kHz / Hori. non omni. à 100 kHz	3,8	N.C	Polyuréthane	700	-5 à +40	N.C	Long. 64,5 / Diam. 9
D/300	-215	145	300	10 kHz	300 kHz	Vert. omni. à 150 kHz / Hori. non omni. à 150 kHz	2,8	N.C	Polyuréthane	700	-5 à +40	N.C	Long. 64,5 / Diam. 9
D/70-H	N.C	N.C	N.C	70	350 Hz	110 kHz	N.C	N.C	Polyuréthane	700	-5 à +40	N.C	Long. total 232 / Long. c.a. 78 / Diam. c.a. 34
D/140-H	N.C	N.C	150	350 Hz	190 kHz	Omni. < 180 kHz	N.C	N.C	Polyuréthane	700	-5 à +40	N.C	Long. total 230 / Long. c.a. 76 / Diam. c.a. 25
Teledyne Benthos													
AQ-17	-175,5	N.C	N.C	1 Hz	10 kHz	N.C	N.C	N.C	N.C	1732	N.C	N.C	Long. 156 / Diam. 25,4
AQ-16	-195	N.C	N.C	1 Hz	10 kHz	N.C	3,5	N.C	N.C	1732	N.C	17,3	Long. 45 / Diam. 16
AQ-18	-171	N.C	N.C	1 Hz	10 kHz	N.C	N.C	N.C	N.C	1732	N.C	N.C	Long. 156 / Diam. 25,4
AQ-25	-172	N.C	N.C	2 Hz	90 kHz	N.C	N.C	N.C	N.C	1500	N.C	N.C	Long. 173,4 / Diam. 25,4
AQ-1	-201	N.C	N.C	1 Hz	10 kHz	N.C	14,5	N.C	N.C	1732	N.C	17,3	Long. 45 / Diam. 16
AQ-4	-201	N.C	N.C	1 Hz	15 kHz	N.C	2,4	N.C	N.C	3300	N.C	4	Long. 33 / Diam. 13
AQ-2000	-201	N.C	N.C	1 Hz	10 kHz	N.C	4,5	N.C	N.C	2000	N.C	14	Long. 46 / Diam. 16,5
Rafos 1	-201	N.C	N.C	1 Hz	10 kHz	N.C	14,5	N.C	N.C	1732	N.C	25	Long. 70 / Diam. 16
Rafos 2	-195	N.C	N.C	1 Hz	10 kHz	N.C	3,5	N.C	N.C	1732	N.C	25	Long. 70 / Diam. 16
High Tech INC													
HTI-90-U	-186	N.C	N.C	2 Hz	20 kHz	N.C	N.C	NAVY I	Polyuréthane	6096	N.C	N.C	Long. 101,6 / Diam.

b. Les brevets d'hydrophones

Nos recherches sur les bases de données des brevets français et américains ont mis en évidence quatre principaux brevets d'hydrophones à basses fréquences. Des brevets à plus hautes fréquences ($f > 50$ Hz) sont également disponibles (Lagier *et al.*, 1992, Rudaz, 1982, Tetlie *et al.*, 1987), notamment pour la prospection sismique. Le brevet de Henri, 1985 étudie la disposition de céramiques tubulaires maintenues par un axe central, comme dans l'exemple de l'hydrophone HTI-04-PCA/ULF (figure 1.17). Le brevet Benarrous, 1981 expose lui, un hydrophone à plus hautes fréquences, dont la conception est proche de celle du Rafos (figure 1.15).

Hydrophone de Kuester, 1961 (figure 1.19)

Ce brevet concerne l'étude des ondes de 5 Hz à 400 Hz. L'hydrophone proposé possède la particularité d'être composé des deux disques piézoélectriques de titanate de barium placés dans une chambre remplie d'huile.

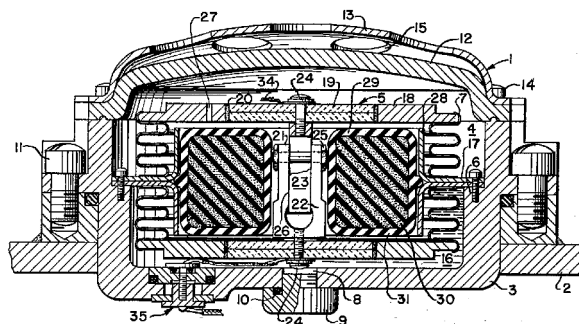


FIGURE 1.19 – Hydrophone développé par Kuester, 1961. (1, 6, 7, 12 et 18) Support. (2) Base. (3) Boîtier. (4) Chambre. (5) Assemblage d'éléments piézoélectriques. (8) Vis pour remplissage de l'huile. (9) Bouchon. (10) Joint. (11, 14, 17 et 24) Vis. (13) Protection supérieure. (15 et 27) Orifices. (16) Huile. (19) Titanate de barium. (20) Colle. (21) Electrodes. (22) Serre-joint. (23) Bloc. (25) Presse-étoupe. (28) Élément cylindrique. (29) Gaz. (30 et 31) Caoutchouc. (34 et 35) Terminaux électriques.

Hydrophone de Cini et Meyers, 1979 (figure 1.20)

L'hydrophone est constitué de deux tubes piézoélectriques placés dans une enceinte principale remplie d'huile. Ce type de structure est utilisée, par exemple, dans le cas de l'hydrophone HTI-04-PCA/ULF (figure 1.17).

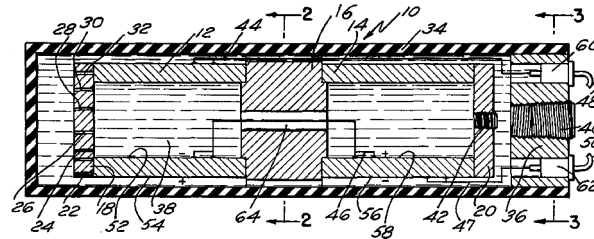


FIGURE 1.20 – Hydrophone développé par Cini et Meyers, 1979. (10) Hydrophone. (12 et 14) Tubes piézoélectriques. (16) Bloc métallique central. (18) Capuchon en métal avec des pores. (20 et 36) Capuchon en métal. (22, 24, 26, 28, 30 et 32) Pores. (34) Enceinte principale. (38) Huile. (40) Valve de remplissage de l'huile. (42) Capuchon. (44 et 46) Electrodes. (47) Fils de connexion des électrodes. (48 et 50) Terminaux. (52 et 56) Surface interne du tube piézoélectrique. (54 et 58) Surface externe du tube piézoélectrique. (60 et 62) Isolateurs. (64) Passage de câble.

Hydrophone de Mott et Pittsburgh, 1980 (figure 1.21)

Dans ce brevet, l'hydrophone est composé de deux disques piézoélectriques séparés par un tube flexible rempli de liquide.

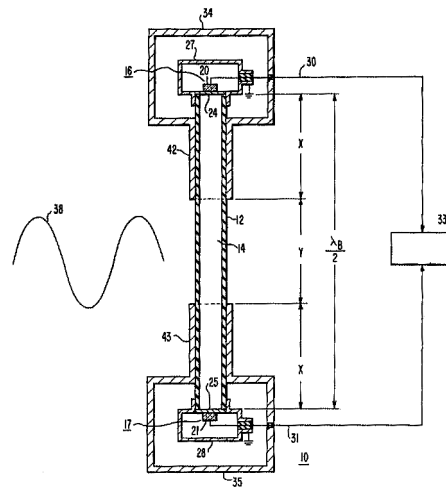


FIGURE 1.21 – Hydrophone développé par Mott et Pittsburgh, 1980. (10) Hydrophone. (12) Tube flexible. (14) Fluide. (16 et 17) Transducteurs. (20 et 21) Disques piézoélectriques. (24 et 25) Membranes. (27 et 28) Boîtier en métal rempli d'huile, de gaz ou d'air. (30 et 31) Electrodes. (33) Circuit électronique. (34 et 35) Container rigide en acier inoxydable rempli d'huile, de gaz ou d'air. (38) Onde. (42 et 43) Manchons.

Hydrophone de Regnault, 1987 (figure 1.22)

Cet hydrophone s'adresse à l'étude des ondes entre 0 et 250 Hz. L'hydrophone est constitué d'un système de disques piézoélectriques. Un système de filtrage mécanique permet de laisser passer les ondes de pression dont les fréquences se situent sous 500 Hz. Les éléments sont incorporés dans une enveloppe tubulaire remplie d'huile.

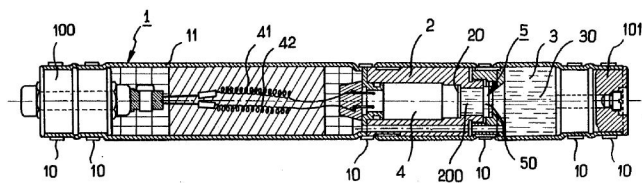


FIGURE 1.22 – Hydrophone de [Regnault, 1987](#). (1) Hydrophone. (2) Corps rigide. (3) Chambre de transmission de pression. (4) Système piézoélectrique. (5) Filtrage mécanique. (10) Brides de fixation. (11) Enveloppe. (20) Surface sensible. (30) Fluide. (41 et 42) Electrodes. (50) Disque pour le filtre passe-bas. (100) Embout de connexion. (101) Embout de remplissage d'huile. (200) Chambre intermédiaire.

III. Modélisation avec COMSOL

Dans cette partie, nous allons modéliser la principale caractéristique des hydrophones et des projecteurs, la sensibilité en fonction de la fréquence. Pour cela, nous utilisons le logiciel de simulation multi-physiques COMSOL et les modules de mécanique des structures et d'acoustique. Ce logiciel permet de réaliser des modélisations numériques, basées sur les éléments finis et de coupler différentes physiques.

L'objectif de ces modélisations est de déterminer les sensibilités de transducteurs. Pour être capable de vérifier les résultats obtenus, nous utilisons des transducteurs déjà en notre possession, dont les courbes des sensibilités sont connues grâce à des mesures en bassin.

Avant de développer les modèles COMSOL, nous pouvons nous intéresser aux éléments qui forment un bon hydrophone, en répondant aux questions de l'approche de [Wilson, 1988](#), dans son livre «*Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers*» :

- Quel aspect du champ acoustique est considéré ? *La pression acoustique.*
- Quelle est la bande de fréquences de réception du signal d'intérêt ? *Pour enregistrer des signaux pour la météorologie, l'idéal serait une bande de fréquences plane jusqu'à une dizaine de kilohertz.*
- La réponse de l'hydrophone sur la bande de fréquences doit-elle être constante en réception ? *Oui.*
- L'hydrophone doit-il enregistrer dans une direction préférentielle ? *On recherche l'omnidirectionnalité.*
- Quel est le niveau du signal enregistré ? *Niveau d'intensité faible à moyen. Sur les flotteurs MERMAID, les signaux correspondent à quelques pascals jusqu'à plusieurs centaines de pascals (voir chapitre 2).*
- Est-ce que le bruit électronique est un paramètre important ? *Oui, il doit être eu-dessous du niveau du signal enregistré.*
- Quelle est la sensibilité souhaitée ? *En moyenne la sensibilité des hydrophones du commerce, viables à grande immersion, varie entre -186 et -201 dB V/ μ Pa, une sensibilité de -195 dB V/ μ Pa serait acceptable.*
- Une calibration est-elle nécessaire ? *Oui.*
- Quelle durée de vie est demandée à l'hydrophone ? *Aussi longue que possible, une durée de vie comparable à celle des flotteurs Multi-MERMAID ($\approx 6-8$ ans) serait acceptable.*
- Quelles sont les contraintes financières de réalisation de l'hydrophone ? *Un tarif inférieur au*

prix des hydrophones équivalents dans le commerce a été demandé, soit un montant inférieur à 1000 €.

- *Quelle est la fiabilité demandée à l'hydrophone ? La durée de vie de l'instrument doit être au minimum de cinq ans car les hydrophones ne pourront pas être remplacés une fois les flotteurs déployés.*
- *Est-ce que des contraintes environnementales, mécaniques ou électriques sont imposées ? Les principales contraintes sont la pression et la corrosion dues à de multiples immersions en environnement marin.*

1. Les éléments modélisés

Dans nos modélisations, nous nous intéressons à une étude sur la sensibilité et la composition de céramiques piézoélectriques. Avant de présenter les éléments étudiés, nous allons présenter les étapes de la conception et de la modélisation sous COMSOL.

Pour définir un modèle sous COMSOL, deux principales étapes sont nécessaires :

Définition avant modélisation

- *Dimension* de travail : en zéro, une, deux ou trois dimensions et avec la possibilité d'utiliser une symétrie axiale dans les cas à une et deux dimension(s).
- *Physique* : la mécanique des structures, acoustique ...
- *Étude* : stationnaire, temporelle, fréquentielle ...

Définition du modèle

- *Définitions globales* : il est possible de spécifier des paramètres, variables et fonctions.
- *Modèle* :
 - *Définition* : permet notamment de spécifier des éléments que l'on souhaite mesurer, d'entrer des équations qui ne sont pas implémentées dans le logiciel et de définir des sondes pour des mesures.
 - *Géométrie* : permet de réaliser les formes et assemblages des éléments à modéliser.
 - *Matériaux* : permet de choisir les matériaux. Une base de données est disponible et des matériaux additionnels peuvent être créés par l'utilisateur.
 - *Physique* : permet de définir toutes les conditions aux limites à appliquer sur la géométrie du modèle en fonction de la physique sélectionnée. Il y a deux types de conditions, les conditions par défaut et les conditions qui peuvent être ajoutées par l'utilisateur. Si une condition est ajoutée, cela réorganise automatiquement les conditions par défaut.
 - *Maillage* : permet de définir le maillage, il peut être généré automatiquement ou manuel-

lement par l'utilisateur.

- *Étude* : permet de régler les paramètres de l'étude, par exemple de définir la bande de fréquences souhaitée.
- *Résultats* : des graphiques sont générés par défaut et l'utilisateur peut en créer des nouveaux.

a. La composition minéralogique des céramiques

Comme nous l'avons vu dans la première partie, il existe différentes compositions de céramiques. Intéressons-nous à l'étude de l'influence de la composition minéralogique des céramiques sur la tension qu'elles génèrent en réponse à une pression. Pour cela, nous utilisons la céramique de l'hydrophone Rafos I que nous avons pu démonter et dont la structure est illustrée en figure 1.15. L'hydrophone est composé d'une céramique tubulaire sans remplissage et recouverte d'une enveloppe en résine.

Pour réaliser cette étude, nous considérons un modèle en deux dimensions avec un axe de symétrie, de façon à reconstituer la céramique tubulaire par révolution d'un rectangle autour de cet axe (figure 1.23). La physique correspond à la mécanique des structures, incluant les éléments piézoélectriques, que nous étudions avec une étude stationnaire.

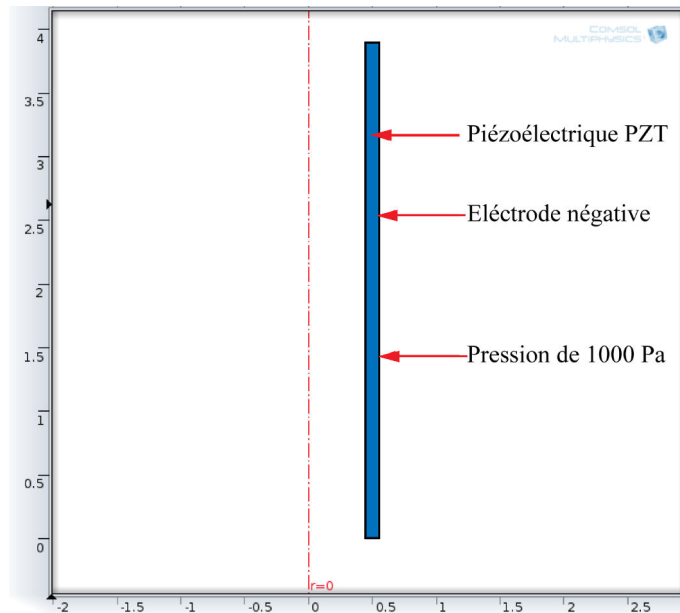


FIGURE 1.23 – Conditions aux limites utilisées pour l'étude de l'influence de la composition des céramiques sur la tension électrique générée en réponse à l'application d'une pression sur la face externe. Les axes sont exprimés en cm.

Pour la construction du modèle, nous considérons une coupe longitudinale de la céramique tubulaire

aux dimensions mesurées (figure 1.23). Nous testons les différentes compositions de PZT disponibles dans la base de données COMSOL (PZT-2, PZT-4, PZT-4D, PZT-5A, PZT-5H, PZT-5J, PZT-7A et PZT-8, tableau 1.3) afin de voir leur influence sur la tension générée en réponse à une même pression. A ce stade, il est nécessaire de définir l'axe de polarisation de la céramique (axe 3 sur la figure 1.10). La figure 1.23 montre les principales conditions utilisées pour la construction du modèle, notamment l'application d'une pression de 1000 Pa, exercée sur la face externe de la céramique. Nous avons choisi cette valeur car elle correspond à la valeur théorique maximale que peut enregistrer la carte électronique du flotteur MERMAID avant saturation. Nous considérons un maillage automatique de COMSOL et une étude stationnaire. Un exemple de résultat pour la composition PZT-7A est illustré en figure 1.24.

Composition	Navy	φ	K_{33}^T	g_{31}	g_{33}	k_{31}	k_{33}	s_{11}^E	s_{33}^E
		kg/m ³		10 ⁻³ Vm/N				10 ⁻¹² m ² /N	
PZT - 2		7600	450	-15,1	38,1	-0,28	0,63	11,6	14,8
PZT - 4	I	7500	1300	-11,1	26,1	0,33	0,66	12,3	15,5
PZT - 4D		7600	1280	-12,8	31,7	0,33	0,71	13,3	16,1
PZT - 5A	II	7750	1700	-11,5	25,0	0,34	0,70	16,4	18,8
PZT - 5H	VI	7500	3150	-9,7	20,8	0,37	0,75	16,7	20,0
PZT - 5J	V	7400	2650	-9,8	21,3	0,36	0,72	16,1	18,9
PZT - 7A		7700	410	-16,2	41,3	0,30	0,67	10,7	13,9
PZT - 8	III	7600	1000	-10,5	24,5	0,31	0,62	11,1	13,9

TABLEAU 1.3 – Principales caractéristiques des céramiques de composition PZT disponibles sous COMSOL. La colonne « Navy » spécifie une nomenclature alternative, principalement utilisées aux Etats-Unis, pour ces compositions. Avec φ la masse volumique (kg/m³), K_{33}^T la constante relative diélectrique, g_{31} , g_{33} , k_{11} , k_{33} , s_{11}^E et s_{33}^E des constantes et facteurs de couplage électromécanique. Les coefficients piézoélectriques disponibles dans la littérature sont mesurés à l'état statique.

Nous étudions la tension maximale générée par les différents types de céramiques en réponse à une même pression (tableau 1.4) sur une coupe transversale et le déplacement radial observé résultant (figure 1.24). Sur la figure 1.24, sont observés un raccourcissement et une elongation du tube suite à l'application de la pression externe. Le tableau 1.4 présente les résultats obtenus pour les différentes compositions. Nous remarquons que la tension maximale générée correspond à la composition PZT-7A, qui présente également le plus petit déplacement. Cette composition serait optimale pour un hydrophone. La plus petite tension observée correspond à la composition PZT-5H et le plus important déplacement à la composition PZT-5A.

b. La sensibilité à l'émission S_v

Intéressons-nous désormais à la sensibilité à l'émission dans le cas des projecteurs (équation 1.29, figure 1.8). Pour la modéliser, nous utilisons la céramique d'un projecteur dont les dimensions,

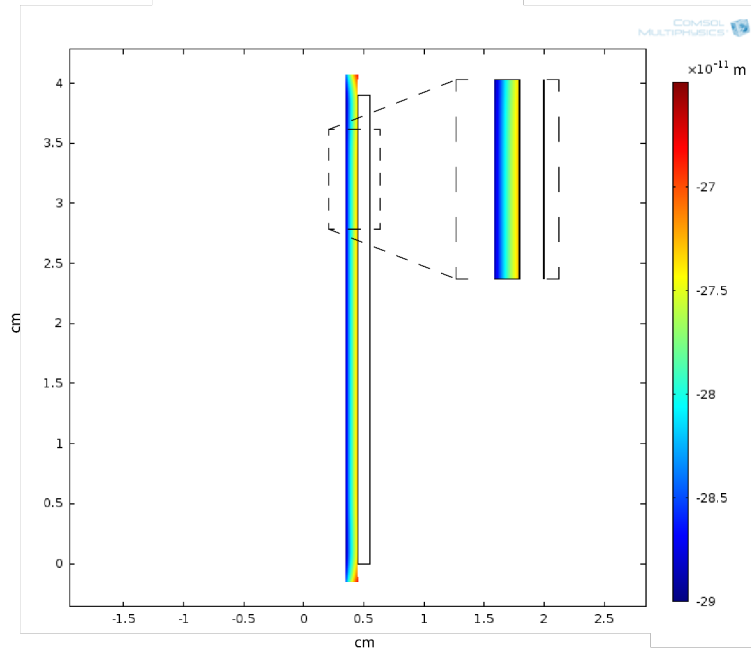


FIGURE 1.24 – Déplacement maximal observé suite à l’application d’une pression de 1000 Pa sur la face externe d’une céramique de type PZT-7A.

PZT	2	4	4D	5A	5H	5J	7A	8
ρ	7600	7500	7600	7750	7500	7400	7700	7600
V_{max}	0,063	0,045	0,045	0,05	0,038	0,04	0,065	0,046
D_{max}	29,15	29,95	32,4	39,4	38,2	38,43	26,55	28,45

TABLEAU 1.4 – Résultats des tensions et déplacements maximaux observés par les différents types de céramiques en réponse à l’application d’une contrainte extérieure de 1000 Pa. Avec ρ la masse volumique (kg/m^3), V_{max} la tension maximale (V) et D_{max} le déplacement maximal (10^{-11} m).

la composition et la structure du projecteur sont connues et sur lesquelles des mesures en bassin ont été effectuées. Notre objectif est de recréer les observations faites en bassin avec la modélisation.

La céramique utilisée est une céramique tubulaire du fournisseur Channel de composition PZT-4 (C5400 ou NAVY I). Celle-ci est recouverte d’une enveloppe en polyuréthane (type UR3450) et une mousse syntactique est placée à l’intérieur de la céramique. Dans le cas d’une polarisation et d’une vibration radiale, cette céramique présente une fréquence de résonance mesurée à 26 kHz et théorique à 30 kHz (équation 1.38 issue de la figure 1.10).

$$f_{théo} = \frac{N_c}{d_m} = \frac{1040}{34,9 \times 10^{-3}} = 30 \text{ kHz} \quad (1.38)$$

Avec N_c la constante de fréquence (Hz m), communiquée par la société Channel, dans le cas d’une vibration radiale pour une composition en PZT-4 et $d_m = 34,9$ mm, le diamètre moyen de la céramique.

Nous simplifions la structure du projecteur à une coupe longitudinale de la céramique tubulaire et du polyuréthane (figure 1.25). Nous négligeons l'effet d'une pression éventuelle de la mousse syntactique, cette dernière étant glissée dans la céramique. Nous ramenons notre étude à un modèle à deux dimensions avec un axe de symétrie. La physique utilisée correspond à l'interaction entre l'acoustique et les éléments piézoélectriques, que nous étudions dans le domaine fréquentiel.

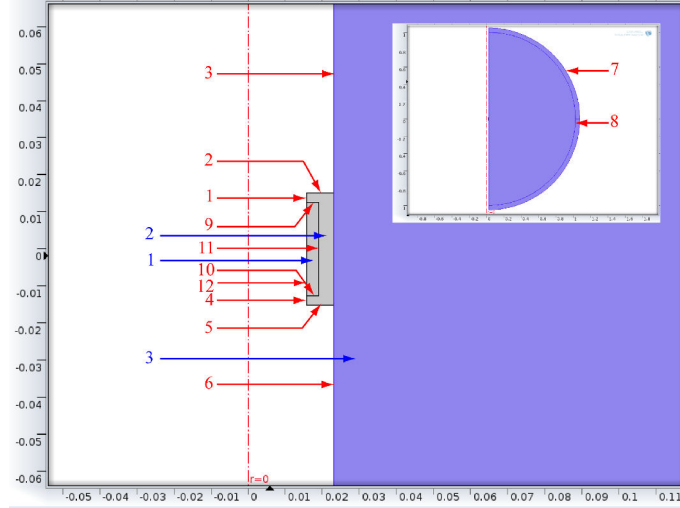


FIGURE 1.25 – Géométrie utilisée pour la modélisation de la sensibilité à l'émission (S_v) d'un projecteur. Les flèches bleues définissent des domaines et les rouges des arêtes. Le domaine 1 représente la céramique, les domaines 2 et 3 les domaines d'application de la pression acoustique, avec respectivement l'enveloppe en UR3450 et l'eau. Les frontières 9, 10 et 11 définissent la frontière acoustique-structure. Les frontières 11 et 12 représentent respectivement les électrodes négative et positive. La frontière 8 définit la condition de champ lointain. Les axes sont exprimés en m.

La sensibilité à l'émission est définie par l'équation 1.29. La géométrie reprend les dimensions de la structure et le domaine aquatique est représenté par un demi-cercle avec une couche absorbante («PML⁷», figure 1.25). Nous utilisons une composition de PZT-4 pour la céramique et nous introduisons les paramètres mécaniques définissant le polyuréthane UR3450. Les conditions limites utilisées sont présentées sur la figure 1.25. Les domaines sont maillés en triangle, à l'exception du domaine PML, qui est en carte («mapped»). Nous étudions la structure dans le domaine fréquentiel de $f_{min} = 20$ kHz à $f_{max} = 36$ kHz.

La courbe de la sensibilité à l'émission obtenue est illustrée en figure 1.26. Les courbes grises représentent les mesures réalisées en bassin sur onze céramiques, la courbe verte la moyenne de celles-ci et la courbe bleue le résultat de la modélisation. On observe que de 20 à 32 kHz la courbe modélisée et celle de la moyenne sont proches. Les fréquences de résonance modélisée ($f_{mod} = 26$ kHz) et observée

7. «Perfectly Matched Layer»

($f_{obs} = 26 \text{ kHz}$) sont confondues. Néanmoins, la modélisation et les mesures en bassin montrent une sous-estimation de la fréquence de résonance par rapport à la valeur théorique ($f_{théo} = 30 \text{ kHz}$). Ce phénomène peut-être observé lors de la conception de projecteurs à cause des contraintes induites par l'ajout d'éléments autour de la céramique. Une franche anti-résonance est également visible à 33 kHz sur la courbe modélisée et n'est pas observée sur les mesures en bassin. Pour s'assurer que cette antirésonance n'était pas un artefact lié au maillage, nous avons testé plusieurs maillages, de types et tailles différents, mais l'antirésonance reste présente.

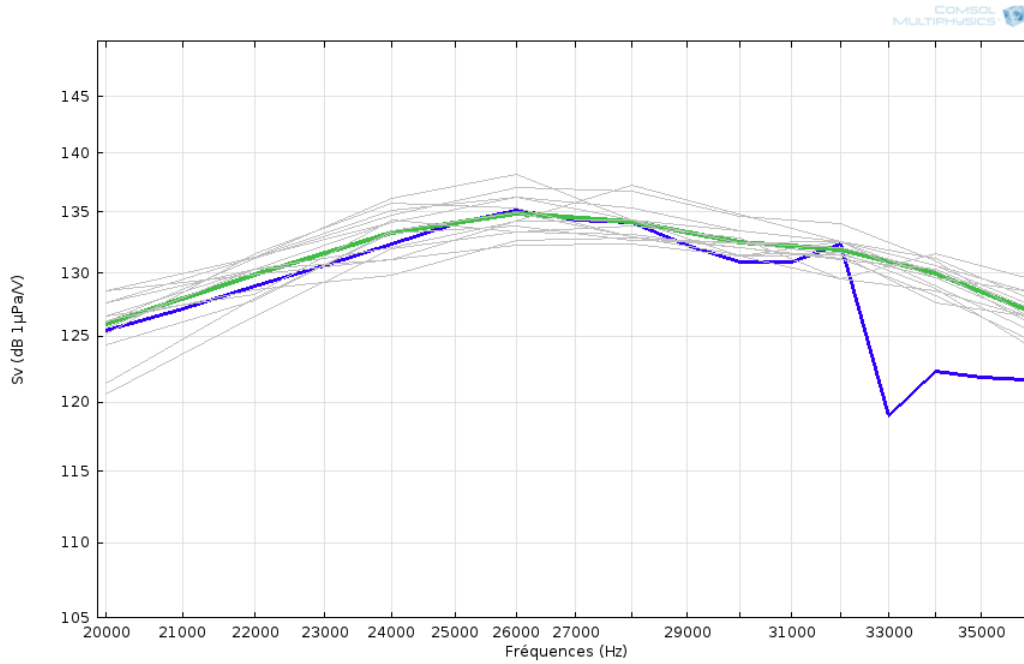


FIGURE 1.26 – Courbes de la sensibilité à l'émission, S_v . Les courbes grises représentent les mesures en bassin réalisées sur onze céramiques identiques, la courbe verte une moyenne de ces dernières et la courbe bleue la modélisation.

Nous avons appliqué ce modèle à une autre céramique. Il s'agit d'une céramique tubulaire de composition identique, d'un diamètre moyen $d_m = 76,3 \text{ mm}$ et utilisée entre 10 et 17 kHz . En considérant une polarisation et une vibration radiale, la fréquence de résonance théorique est $f_{obs} = 13 \text{ kHz}$ (équation 1.39, figure 1.10). La courbe de la sensibilité obtenue, en prenant en compte l'épaisseur de l'UR3450 autour de la céramique, est illustrée en figure 1.27.a.

$$f_{théo} = \frac{N_c}{d_m} = \frac{1040}{76,3 \times 10^{-3}} = 13 \text{ kHz} \quad (1.39)$$

La fréquence de résonance modélisée ($f_{mod} = 11 \text{ kHz}$, figure 1.27.a) est différente des mesures réalisées en bassin et de la fréquence théorique ($f_{obs} = 13 \text{ kHz}$ et $f_{théo} = 13 \text{ kHz}$). La modélisation sous-estime la fréquence de résonance de 2 kHz . Comme les caractéristiques des compositions des

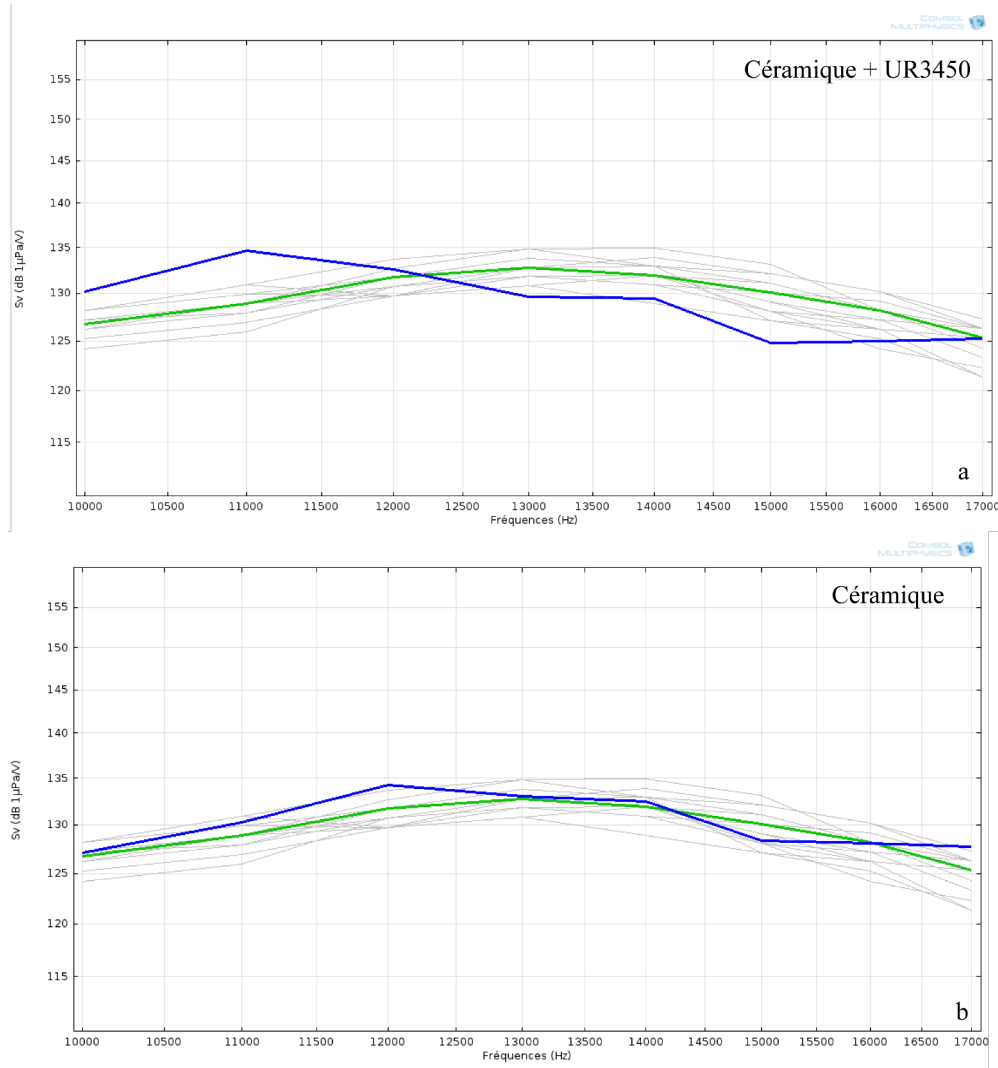


FIGURE 1.27 – Courbes de la sensibilité à l’émission, céramique (2). La figure (a) représente un test sur la céramique et l’UR3450. La figure (b) représente un test sur la céramique seule. Les courbes grises représentent les mesures en bassin réalisées sur onze céramiques avec l’UR3450, les courbes vertes une moyenne de ces dernières et les courbes bleues les modélisations.

matériaux peuvent légèrement varier suivant les fournisseurs, nous avons testé différents paramètres et épaisseurs de l’enveloppe (masse volumique, épaisseur ...). Ces tests n’ont pas permis d’obtenir une meilleure estimation de la fréquence de résonance. Nous avons également réalisé une modélisation de la céramique seule (figure 1.27.b). Dans ce dernier cas, nous obtenons une fréquence de résonance plus proche de la fréquence théorique ($f_{théo} = 12$ kHz, figure 1.27.b), mais cela ne nous a pas permis d’obtenir une fréquence de résonance modélisée identique à la valeur observée. Néanmoins, nous observons que la tendance de la courbe de la sensibilité à l’émission est plutôt bien reproduite.

c. La sensibilité à la réception S_h

Intéressons-nous à la sensibilité à la réception définissant les hydrophones. Nous utilisons la première céramique de la modélisation de la sensibilité à l'émission (céramique tubulaire de composition PZT-4 de la société Channel), que nous étudions en coupe longitudinale (deux dimensions avec un axe de symétrie) avec une physique d'interaction acoustique-structure en domaine fréquentiel. Les mesures en bassin sont réalisées de 10 à 17 kHz.

La définition de la sensibilité à la réception (équation 1.21) est implantée dans le logiciel. On définit une sonde sur la céramique afin de mesurer la tension générée suite à la pression exercée en face externe. La géométrie reprend les dimensions de la céramique et la philosophie de la figure 1.25. Les conditions aux limites reviennent à définir le rectangle de la céramique comme le matériel piézoélectrique (domaine 1, figure 1.25) et à appliquer une pression sur la face externe de la céramique (frontière 11, figure 1.25). Le domaine est maillé en triangle et nous étudions la structure dans le domaine fréquentiel jusqu'à 35 kHz avec des mesures en bassin de $f_{min} = 10$ kHz à $f_{max} = 17$ kHz. La courbe de la sensibilité à la réception obtenue est illustrée en figure 1.28.

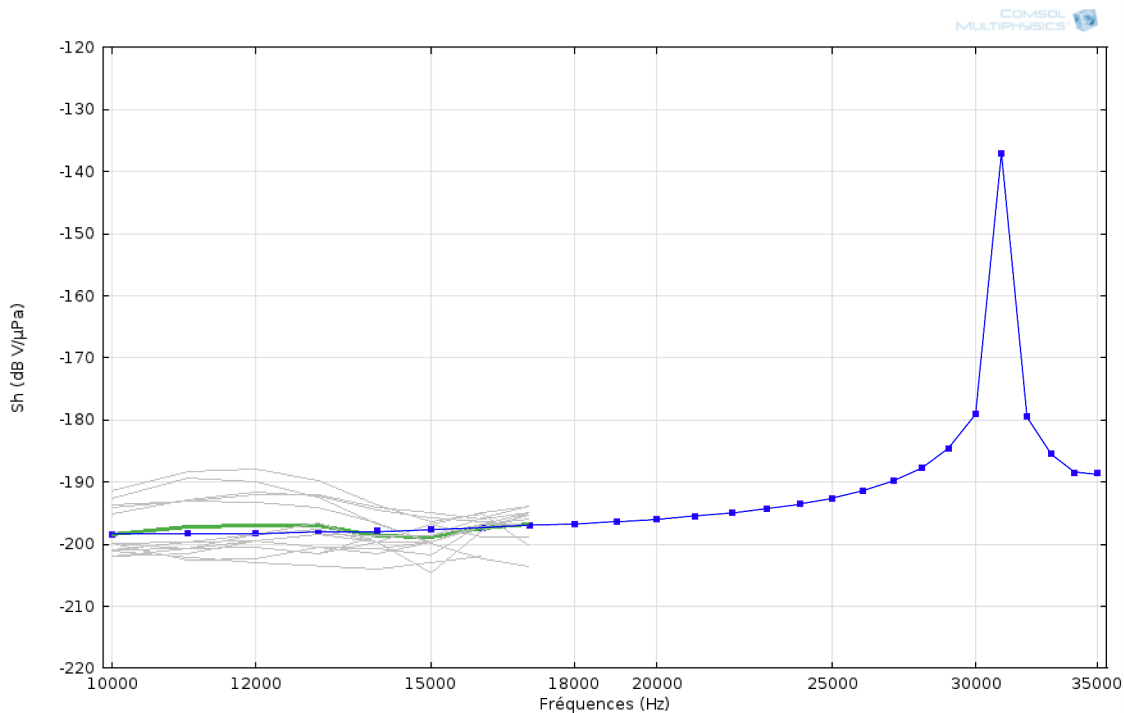


FIGURE 1.28 – Courbe de la sensibilité à la réception, céramique (1). Les courbes grises représentent les mesures en bassin réalisées sur onze céramiques, la courbe verte une moyenne de ces dernières et la courbe bleue la modélisation.

Les courbes grises représentent les mesures réalisées en bassin sur onze céramiques, la courbe verte

la moyenne de celles-ci et la bleue le modèle obtenu. On observe que dans la bande de fréquences des mesures en bassin, le modèle suit les mesures. A plus hautes fréquences, on observe une franche résonance à 31 kHz. Malheureusement, nous n'avons pas pu comparer les résultats obtenus avec des valeurs de mesures en bassin au-delà de 17 kHz.

Pour valider ce modèle, nous l'appliquons à un hydrophone dont la courbe de sensibilité est connue. Nous avons eu l'opportunité de démonter l'hydrophone OAS-E2PD (figure 1.16), ce qui nous a permis d'étudier son assemblage. Comme nous ne connaissons pas la composition des céramiques, nous avons testé toutes les compositions disponibles sous COMSOL. Un exemple de courbe obtenue, pour la composition PZT-4, est illustrée en figure 1.29. Aucune des compositions n'a donné une courbe de sensibilité plus proche de la courbe de la sensibilité communiquée par la constructeur que le PZT-4. On constate que la tendance de la sensibilité à la réception est reconstruite, ainsi que l'anti-résonance du constructeur vers 9 kHz que nous observons à 10 kHz. Mais ni le niveau de la sensibilité ($N_{constructeur} = -192$ dB réf. V/ μ Pa, $N_{modélisé} = -198$ dB réf. V/ μ Pa), ni les amplitudes des variations ($A_{constructeur} = 10$ dB réf. V/ μ Pa, $A_{modélisé} = 12$ dB réf. V/ μ Pa) ne le sont.

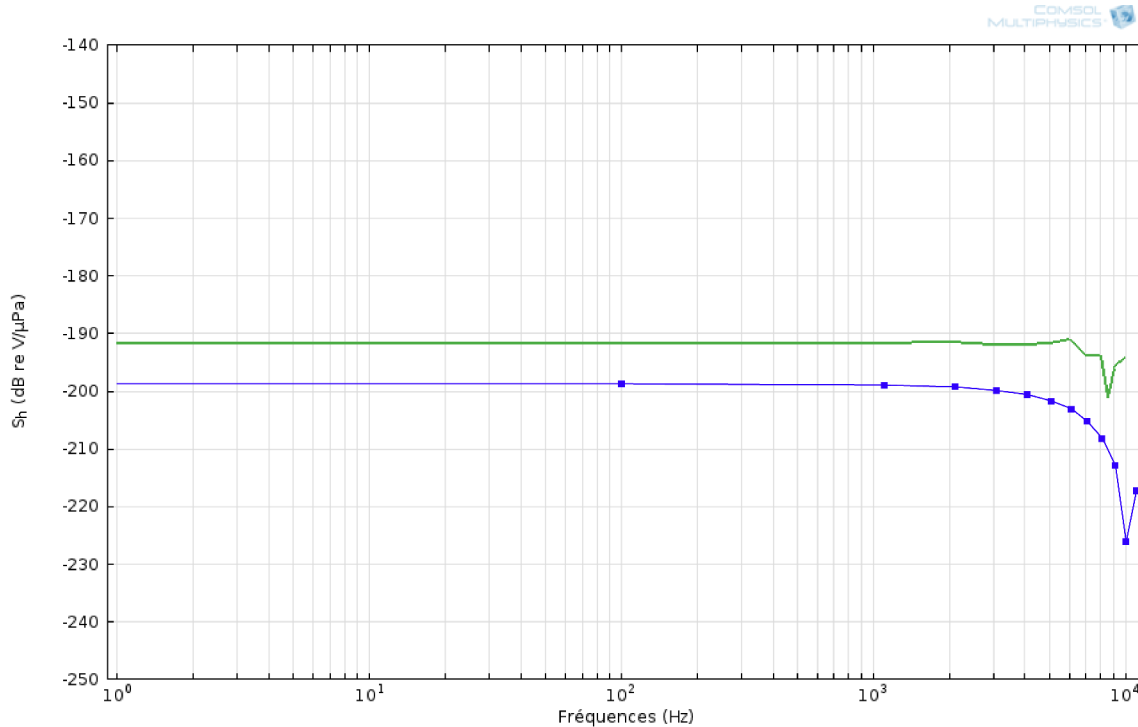


FIGURE 1.29 – Courbe de la sensibilité à la réception de l'hydrophone OAS-E2PD. Les courbes verte et bleue représentent respectivement, les valeurs du constructeur et modélisées.

Nous avons fait une observation similaire sur la modélisation de l'hydrophone Rafos I (figure 1.30) que nous avons également pu démonter (figure 1.15) et dont la composition de la céramique n'était

pas communiquée. On observe sur la figure 1.30, que la tendance de la courbe de la sensibilité est reproduite, mais ni le niveau ($N_{constructeur} = -202$ dB réf. V/ μ Pa, $N_{modélisé} = -210$ dB réf. V/ μ Pa) ni les amplitudes maximales ($A_{constructeur} = 20$ dB réf. V/ μ Pa, $A_{modélisé} = 12$ dB réf. V/ μ Pa) ne le sont.

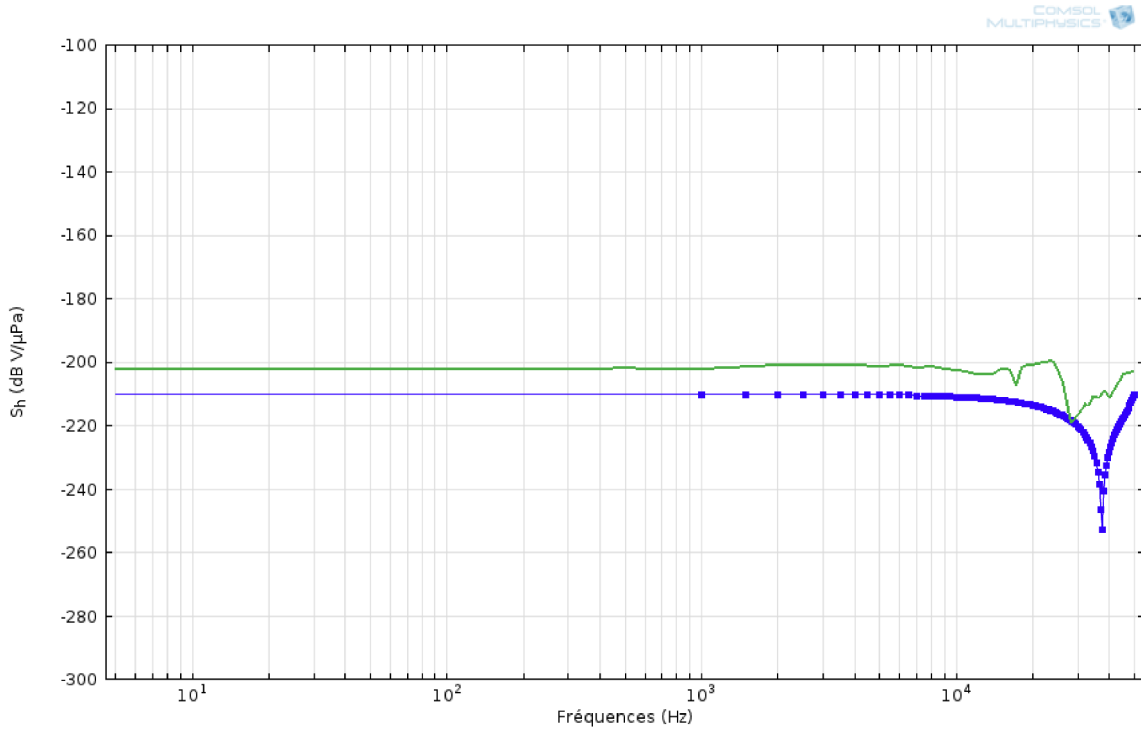


FIGURE 1.30 – Courbe de la sensibilité à la réception de l’hydrophone Rafos I. Les courbes verte et bleue représentent respectivement, les valeurs du constructeur et modélisées.

Sur les deux hydrophones testés, on observe une sous-estimation du niveau de la sensibilité et une sur-estimation des valeurs des résonances lors des modélisations. Cet écart peut être partiellement expliqué par le fait que nous ne connaissons pas la composition de la céramique utilisée. On peut également suspecter l’enveloppe de jouer un rôle d’amortissement, ce qui pourrait abaisser les résonances. Ce phénomène peut être observé lors de la conception d’hydrophone. Ces modèles permettent néanmoins de reproduire les caractéristiques générales de la sensibilité à la réception.

d. La directivité

Concernant la directivité, nous implémentons l’équation de la directivité d’un rectangle (équation 1.34), qui correspond à un cylindre après révolution autour d’un axe, dans COMSOL et nous étudions la directivité de l’hydrophone OAS-E2PD. D’après la documentation, cet hydrophone est omnidirectionnel à 1 kHz. Le diagramme de directivité obtenu (figure 1.31), confirme l’omnidirectionnalité de l’hydrophone OAS-E2PD, à cette fréquence.

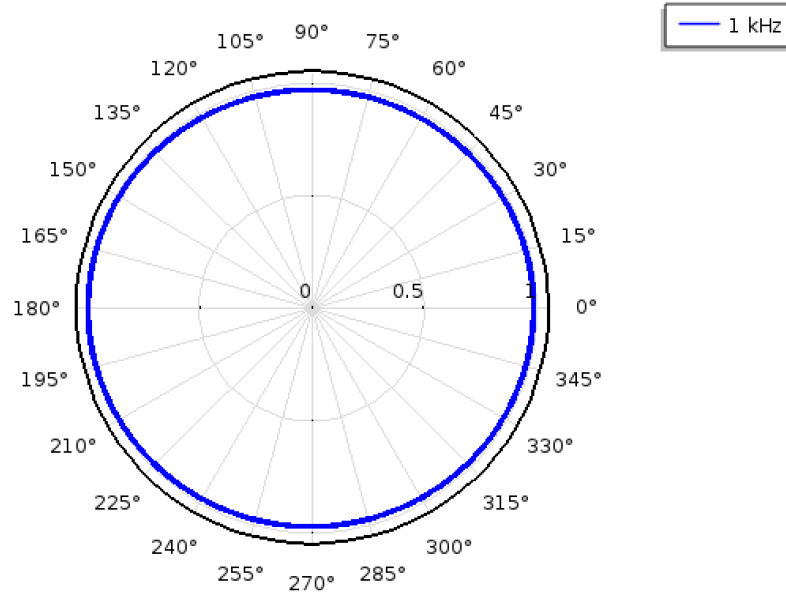


FIGURE 1.31 – Directivité de l'hydrophone OAS-E2PD à 1 kHz.

e. Conclusions sur les modélisations

De manière générale, nous reproduisons les tendances des sensibilités :

- A l'émission, le niveau de la sensibilité est bien reproduit, les résonances modélisées sont proches des résonances observées et théoriques, bien que la valeur de la fréquence de résonance du deuxième exemple soit sous-estimée de 2 kHz par la modélisation. Ceci peut être problématique car si une céramique est utilisée au-dessous ou au-dessus de sa fréquence de résonance, la fréquence peut correspondre par exemple, à son anti-résonance. Dans ce cas la sensibilité de la céramique est très basse. Il est donc nécessaire de vérifier les résultats des modélisations avec des mesures en bassin.
- A la réception, nous reconstituons bien la tendance des sensibilités, mais leurs niveaux et les amplitudes qu'elles peuvent prendre ne le sont pas. La modélisation sous-estime la valeur de la sensibilité, alors que nous aurions attendu un effet inverse. En effet, les modélisations considèrent la céramique seule, libre de vibrer sans contrainte, alors que l'assemblage d'un hydrophone peut induire des contraintes qui auraient tendance à abaisser la sensibilité.

Pour la suite de notre étude, nous avons utilisé les modèles développés sous COMSOL pour proposer un hydrophone viable à grande immersion. Comme les modélisations en deux dimensions ne nous ont pas entièrement satisfaits, sa structure se base sur celle des hydrophones que nous avons étudiés et démontés. Nous utilisons néanmoins ces modèles car nos tests avec des modélisations en trois-

dimensions n'ont pas été concluants. Nous avons rencontré des limitations au niveau de la définition des conditions aux limites. Nous avons décidé de ne pas complexifier davantage les modèles en deux dimensions en modélisant un hydrophone complet.

2. Proposition d'hydrophone

L'un des objectifs de ce travail se concentre sur la conception d'un hydrophone viable à basses fréquences (< 2 Hz), jusqu'aux fréquences d'acquisitions météorologiques (≈ 10 kHz) et évoluant à de grandes immersions (cas d'une grande immersion figure 1.14). Nous allons désormais nous intéresser aux choix et à la conception des différents éléments qui composent un hydrophone, en posant les questions liées aux contraintes de son utilisation.

Etape 1, céramique : nous avons choisi d'utiliser une céramique comme partie sensible de l'hydrophone car ce matériel a été source de nombreuses études. La forme, la taille et la composition d'une céramique définissent ses principales caractéristiques :

Forme : de par sa forme, la sphère est adaptée à la résistance à la pression, mais elle n'est pas utilisée à de grandes immersions, notamment à cause de la difficulté de remplissage d'huile (les sphères correspondent à l'assemblage de deux hémisphères avec un orifice pour laisser passer les électrodes) et pour la conception de l'enveloppe externe. Les enveloppes sont principalement en résine, coulées directement sur la sphère. Ces dernières s'utilisent à de faibles immersions, comme par exemple pour l'hydrophone ITC-1001. A dimensions similaires avec des tubes piézoélectriques, les sphères présentent également de moins bonnes sensibilités (Marage et Mori, 2009). La forme tubulaire est largement utilisée pour les grandes immersions (Rogers, 1986), comme par exemple dans les hydrophones OAS-2EPD (figure 1.16), HTI-04PCA/ULF (figure 1.17) et TUBA6000.

Taille : la taille d'une céramique se définit généralement à hautes fréquences en fonction de la longueur d'onde d'étude. Pour l'étude d'une céramique seule, la taille doit correspondre au quart de la longueur d'onde, ce qui est difficilement applicable à notre étude. Il est donc nécessaire de faire des compromis. De manière générale, plus la taille d'une céramique est grande et plus sa fréquence de résonance sera basse et inversement. De même, plus une céramique est petite face à la longueur d'onde d'étude, plus elle sera omnidirectionnelle. Pour proposer un hydrophone large bande, il faut donc trouver le bon compromis entre une taille de céramique adaptée aux basses fréquences et une bande de fréquence assez large pour monter à de plus hautes fréquences.

Il existe plusieurs fournisseurs de céramique, par exemple Channel, Noliac, Ferroperm ... Mais l'achat de céramique en petite quantité n'est possible que chez relativement peu de fournisseurs.

Pour cette étude, nous nous basons sur les céramiques proposées par le fournisseur STEMiNC, qui dispose de céramiques tubulaires de diverses dimensions. Nous étudions, avec les modèles COMSOL, six modèles de céramique avec des fréquences de résonance communiquées entre 25 et 61 kHz (tableau 1.5). Bien que dans le cas d'un hydrophone les fréquences de résonance importent peu, nous les avons étudiées ainsi que les sensibilités à l'émission et à la réception afin d'appliquer et d'effectuer une nouvelle validation des modèles que nous avons développés. La céramique qui montre le meilleur compromis entre large bande et basses fréquences est la céramique SMC4037T50111 (tableau 1.5.c). Sa courbe de sensibilité à la réception modélisée est plate à ± 3 dB de 10 Hz à 19 kHz (figure 1.32) et le niveau modélisé est d'environ -199 dB V/ μ Pa.

On peut estimer la fréquence de résonance de la céramique, en utilisant l'équation d'un cylindre vibrant et polarisé radialement (tableau 1.2). Avec $D_m = 36,5$ mm, $\rho = 7800$ kg/m³, $s_{11}^D = s_{11}^E (1 - k_{31}^2) = 10,41 \times 10^{-12}$ ($k_{31} = 0,32$), on obtient une fréquence proche ($f_{théo} = 30,6$ kHz, équation 1.40) de celle modélisée ($f_{mod} = 30$ kHz).

$$f_{théo} = \frac{1}{\pi D_m \sqrt{\rho s_{11}^D}} = \frac{1}{\pi 0,037 \sqrt{\rho 10,41 \times 10^{-12}}} = 30,6 \text{ kHz} \quad (1.40)$$

Composition : notre étude sur la composition des céramiques (tableau 1.4, partie III.1.a) a démontré que la composition PZT-7A permet de générer une tension plus importante que les autres compositions (PZT-2, PZT-4, PZT-4D, PZT-5A, PZT-5H, PZT-5J et PZT-8, tableau 1.4) suite à l'application d'une même pression. Malheureusement, les céramiques proposées sont de composition PZT-4 modifiée ou PZT-5J et la céramique 1.5.c est en PZT-4 modifiée, nous n'avons donc pas eu le choix de la composition.

Etape 2, enveloppe, support et remplissage : l'immersion de l'hydrophone contraint les éléments comme l'enveloppe et le remplissage (figure 1.14).

Enveloppe : l'immersion nous contraint à travailler avec des enveloppes semi-rigides. Le NBR est un matériel couramment utilisé pour ses propriétés de résistance à la pression, nous nous proposons donc de l'utiliser. Nous proposons une architecture de l'enveloppe en «chaussette» dans laquelle nous ajoutons des paires de tétines placées à 120° les unes des autres, afin de placer la céramique tout en la laissant vibrer librement («free-flooded», Rogers, 1986).

Série STEMiNC	Dimensions (mm)			Compositions	Fréquences STEMiNC (kHz)	Fréquences modélisées (kHz)	Bande de fréquences de stabilité à (kHz)		
	OD	ID	H				± 1 dB	± 2 dB	± 3 dB
a. SMC3831T25111	38	31	25	PZT-4 modifié	25 ± 1	31	1 à 13	1 à 17	1 à 19
b. SMC32D30H10410	32	30	10	PZT-5J (Navy V)	29 ± 0,5	32	1 à 10,5	1 à 14,5	1 à 17,5
c. SMC4037T50111	40	33	50	PZT-4 modifié	32 ± 1	30	1 à 14	1 à 16	1 à 19
d. SMC26D22H19111	26	22	13	PZT-4 modifié	43 ± 1,5	44	1 à 16	1 à 22	1 à 26
e. SMC20D17H5	20	17	5	PZT-4 modifié	57 ± 2	58	1 à 19	1 à 26	1 à 30
f. SMC1614T5410	16	14	5	PZT-5J (Navy V)	61 ± 3	65	1 à 22	1 à 30	1 à 35

TABLEAU 1.5 – Céramiques STEMiNC testées. Avec OD le diamètre externe, ID le diamètre interne et H la hauteur des céramiques (mm).

Support : l'aluminium anodisé est couramment utilisé pour les supports des hydrophones comme par exemple sur l'hydrophone OAS-E2PD (figure 1.16). Ce matériel montre une bonne résistance à la pression. L'anodisation permet de renforcer la résistance à la corrosion et à l'usure. Sur le schéma de l'hydrophone proposé, deux vis sont placées sur le support pour faciliter le remplissage de l'huile. Un dessin mécanique du support proposé est disponible en annexe A.

Remplissage : le remplissage de la structure se fait avec une huile compatible avec les matériaux utilisés en contact, notamment l'enveloppe et l'argenture des électrodes.

Etape 3, éléments de montage : les éléments de montages correspondent aux vis, joints et aux colliers.

Vis et collier (métal) : les matières couramment utilisées pour les vis et le collier serflex sont l'acier inoxydable et le titane. Le coût de l'acier inoxydable étant moins élevé que celui du titane, nous pouvons donc utiliser ce matériel.

Joints et collier (caoutchouc) : les joints que nous nous proposons d'utiliser sont de type O-ring et dont la matière peut également être en NBR. Afin de limiter la corrosion du collier serflex en acier inoxydable, nous ajoutons un second collier également en NBR.

Coût : le tableau 1.6 regroupe les éléments cités ci-dessus avec un ordre de grandeur de tarifs associés et des exemples de fournisseurs potentiels. Le montant est ramené à un hydrophone unitaire bien que le coût de certains éléments ne puisse pas être divisé. Par exemple le coût du moule de l'enveloppe externe.

L'hydrophone proposé, en «free-flooded» (Rogers, 1986), dont les caractéristiques sont tirées des modélisations précédentes, est illustré sur les figures 1.32 et 1.33. L'hydrophone est au niveau de maturité technologique TRL3 (tableau 1.7, Mankins, 1995),

Éléments	Composition, type ...	Exemple de fournisseurs	Prix (TTC)
Céramique	Tubulaire PZT-4	STEMiNC	≈ 45 €
Enveloppe	NBR	Azur Caoutchouc	≈ 180 €
Support	Aluminium anodisé	OCA	≈ 300 €
Connectique	BH2	Eurocéanique	≈ 100 €
Remplissage	Hypsin 32 AWS	Castrol	≈ 8 €
Vis	Acier inoxydable	Radiospare	< 50 €
Colliers	Acier inoxydable et NBR		
Joints	O-ring en NBR		
Estimation par hydrophone	≈ 683 €		

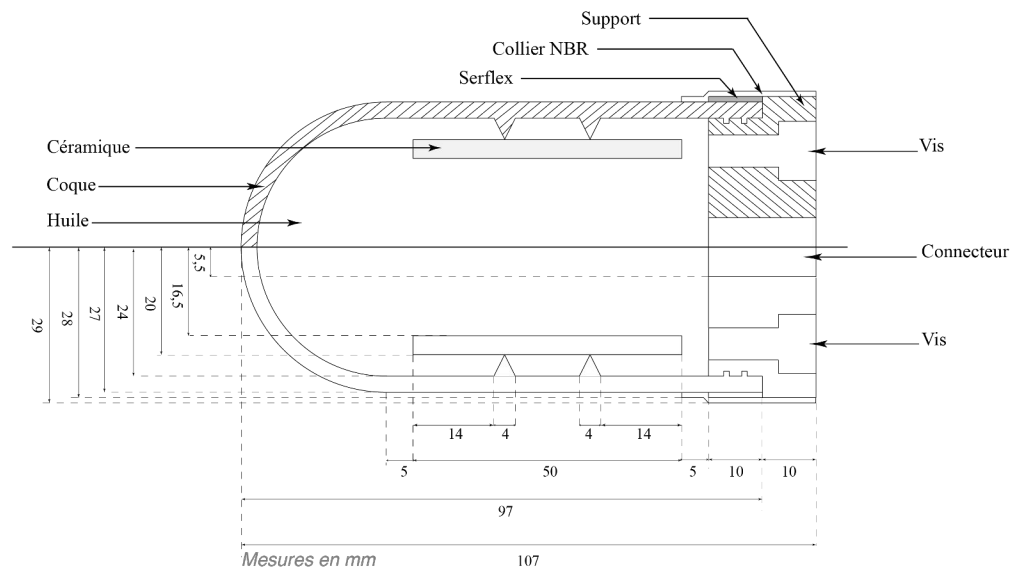
TABLEAU 1.6 – Tableau regroupant les principaux composants de l’hydrophone proposé, avec des exemples de fournisseurs et d’ordres de grandeur de tarifs associés. Le montant est donné pour un hydrophone, bien que certains prix ne puissent pas être divisés. La conception de l’enveloppe est d’environ 900 € pour cinq pièces et l’huile est vendue 40 € par quantité minimum de 5 L.

Étapes	Actions
TRL 1	Principes de base observés
TRL 2	Concept technologique observé
TRL 3	Formulation des applications potentielles et étude de faisabilité
TRL 4	Création d’un prototype avec validation par des essais en laboratoire
TRL 5	Validation du prototype en environnement significatif
TRL 6	Validation par un démonstrateur produit en environnement significatif
TRL 7	Validation par un démonstrateur produit en environnement opérationnel
TRL 8	Validation et qualification du processus de production
TRL 9	Suivi du produit sur le marché

TABLEAU 1.7 – Échelle des niveaux de maturité technologique. D’après [Mankins, 1995](#).

Description

Hydrophone conçu pour évoluer à de grandes immersions grâce à une enveloppe semi-rigide en «Nitrile Butadiene Rubber» avec une céramique tubulaire placée en équipression dans un bain d'huile. Il offre une réponse omnidirectionnelle.



Descriptif technique

Bande de fréquences d'utilisation : 10 Hz à 30 kHz
 Sensibilité à la réception : - 199 dB ref. V/ μ Pa à 1 m à 20°C
 Bande de fréquences à la réception : 10 Hz à 19 kHz \pm 3 dB
 Sensibilité à l'émission : 139 dB ref. μ Pa/V à 1 m à 20°C
 Fréquences de résonance modélisée : 30 kHz
 Omnidirectionnalité : jusqu'à 13 kHz \pm 3 dB, 11 kHz \pm 2 dB, 7,5 kHz \pm 1 dB
 Capacité du fournisseur : 33,6 nF
 Immersion : > 6000 m
 Enveloppe : Nitrile Butadiene Rubber
 Céramique : tubulaire en PZT-4

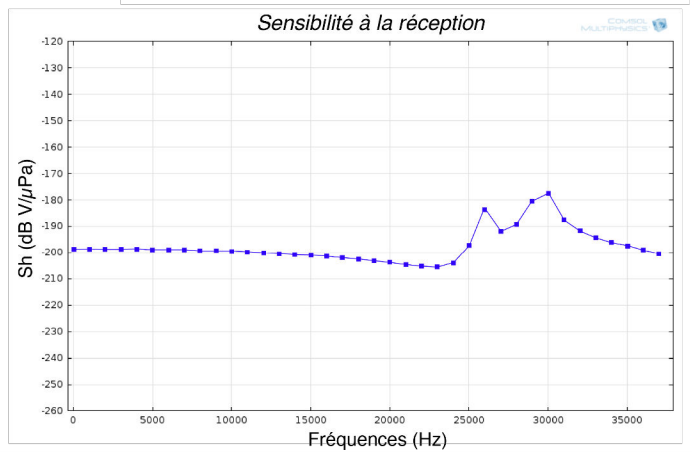
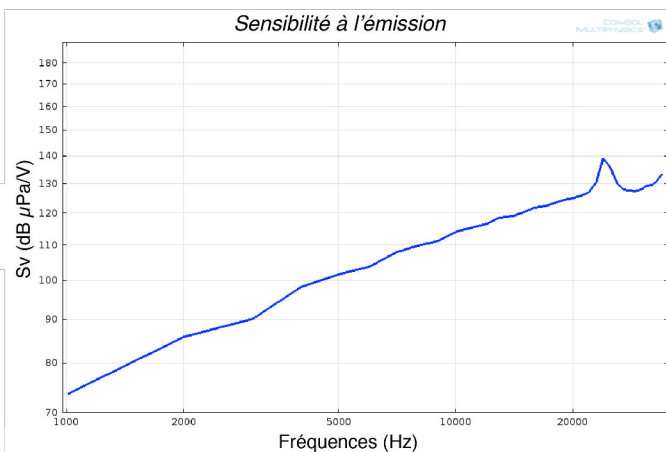
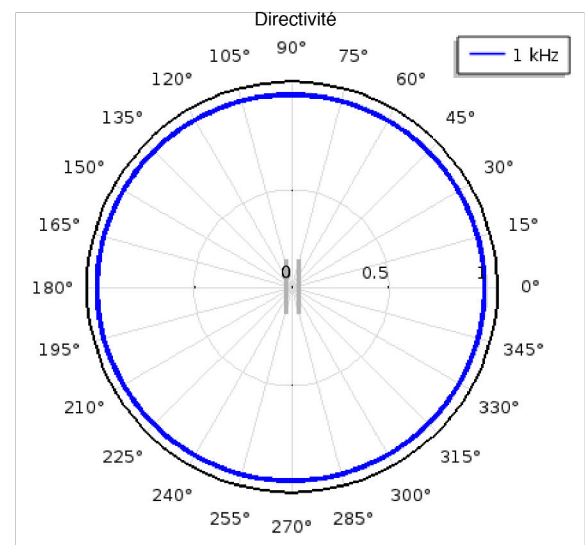


FIGURE 1.32 – Proposition d'hydrophone.

La prochaine étape sera la conception d'un prototype avec la réalisation de tests en laboratoire. Néanmoins, nous pouvons reprendre les questions soulevées en introduction de cette partie et regarder celles auxquelles nous avons déjà répondu (tableau 1.8).

- Quel aspect du champ acoustique est considéré? *La pression acoustique.*
- Quelle est la bande de fréquences de réception du signal d'intérêt? *Pour enregistrer des signaux pour la météorologie, l'idéal serait une bande de fréquences plane jusqu'à une dizaine de kilohertz.* Nous proposons un hydrophone dont la sensibilité à la réception est plate de 10 Hz à 19 kHz ± 3 dB, ce qui permet de couvrir de nombreuses applications et de satisfaire une application potentielle en météorologie. La modélisation ne nous a pas permis de descendre en-dessous de 10 Hz, nous avons rencontré un problème de non convergence du modèle développé, similaire que celui de l'exemple de la modélisation de la céramique de l'hydrophone Rafos.
- La réponse de l'hydrophone sur la bande de fréquences doit-elle être constante en réception? *Oui.* Elle l'est de 10 Hz à 19 kHz ± 3 dB.
- L'hydrophone doit-il enregistrer dans une direction préférentielle? *On recherche l'omnidirectionnalité.* L'hydrophone est omnidirectionnel jusqu'à 13 kHz ± 3 dB, jusqu'à 11 kHz ± 2 dB et jusqu'à 7,5 kHz ± 1 dB (figure 1.32).
- Quel est le niveau du signal enregistré? *Niveau d'intensité faible à moyen. Sur les flotteurs MERMAID, les signaux correspondent à quelques pascals jusqu'à plusieurs centaines de pascals (voir chapitre 2).* Les premières acquisitions en milieu marin nous permettront de répondre à cette question (TRL5, tableau 1.7).
- Est-ce que le bruit électronique est un paramètre important? *Oui, il doit être au-dessous du niveau du signal enregistré.* Le développement d'un hydrophone s'accompagne de celui de sa carte électronique d'acquisition. Nous pourrions donc répondre à cette question après les premiers tests en environnement réel (TRL5, tableau 1.7).
- Quelle est la sensibilité souhaitée? *En moyenne la sensibilité des hydrophones du commerce, viables à grande immersion, varie entre -186 et -201 dB V/ μ Pa, une sensibilité de -195 dB V/ μ Pa serait acceptable.* Les résultats obtenus avec les modélisations montrent une sensibilité à -199 dB V/ μ Pa, donc dans la bande des valeurs souhaitées. Toutefois, il faut considérer cette valeur avec précaution car les modélisations réalisées sur d'autres céramiques d'hydrophone (Rafos et OAS-E2PD) ont montré une sous-estimation des sensibilités. Après des premiers tests en laboratoire, nous pourrions voir si une tendance similaire s'observera (TRL4, tableau 1.7).
- Une calibration est-elle nécessaire? *Oui.* Nous pourrions appliquer les calibrations que nous avons développées et auxquelles le chapitre 2 est consacré.
- Quelle durée de vie est demandée à l'hydrophone? *Aussi longue que possible, une durée de*

vie comparable à celle des flotteurs Multi-MERMAID ($\approx 6-8$ ans) serait acceptable. Nous pourrions répondre à cette question après une étude plus longue (TRL9, tableau 1.7).

- Quelles sont les contraintes financières de réalisation de l'hydrophone ? *Un tarif inférieur au prix des hydrophones équivalents dans le commerce a été demandé, soit un montant inférieur à 1000 €.* Le tarif proposé sur le tableau 1.6 est inférieur au montant souhaité, néanmoins certains tarifs sont indivisibles. Par exemple le coût de réalisation d'un moule pour l'enveloppe externe est d'environ 900 € pour cinq pièces. De même, l'huile ne peut pas être achetée en quantité plus faible. Néanmoins en se basant sur la conception d'une petite série d'hydrophones de cinq pièces, le montant unitaire est en-dessous du montant maximum fixé.
- Quelle est la fiabilité demandée à l'hydrophone ? *La durée de vie de l'instrument doit être au minimum de cinq ans car les hydrophones ne pourront pas être remplacés une fois les flotteurs déployés.* Cette question pourra être vérifiée après plusieurs tests en conditions réelles (TRL4 ..., tableau 1.7). En considérant des immersions multiples des flotteurs (MERMAID ≈ 140 cycles, Multi-MERMAID $\approx 6-8$ ans), il sera également nécessaire de prendre en compte le vieillissement de la céramique.
- Est-ce que des contraintes environnementales, mécaniques ou électriques sont imposées ? *Les principales contraintes sont la pression et la corrosion dues à de multiples immersions en environnement marin.* La conception a tenu compte des contraintes environnementales imposées, les tests en environnement significatif (TRL4 et TRL5, tableau 1.7) permettront de vérifier la bonne tenue de l'hydrophone.

Résultats Expétés	Résultats Obtenus
<i>Quel aspect du champ acoustique est important ?</i>	
Pression acoustique	Pression acoustique
<i>Quelle est la bande de fréquences de réception du signal d'intérêt ?</i>	
Jusqu'à ≈ 10 kHz	10 Hz à 19 kHz ± 3 dB
<i>La réponse de l'hydrophone sur la bande de fréquences doit-elle être constante en réception ?</i>	
Oui	10 Hz à 19 kHz ± 3 dB
<i>L'hydrophone doit-il enregistrer dans une direction préférentielle ?</i>	
Omnidirectionnalité	Omnidirectionnel jusqu'à 13 kHz ± 3 dB, jusqu'à 11 kHz ± 2 dB et jusqu'à 7,5 kHz ± 1 dB
<i>Quel est le niveau de signal enregistré ?</i>	
Intensité faible à moyenne	A vérifier lors des premiers tests (TRL5)
<i>Est-ce que le bruit électronique est un paramètre important ?</i>	
Oui	A vérifier lors des premiers tests (TRL4 et TRL5)
<i>Quelle est la sensibilité souhaitée ?</i>	
Entre -186 et -201 dBV/ μ Pa	-199 dBV/ μ Pa
<i>Une calibration est-elle nécessaire ?</i>	
Oui	A réaliser lors des premiers tests (TRL5)
<i>Quelle durée de vie est demandée à l'hydrophone ?</i>	
Autant que le véhicule support MultiMERMAID, au moins 5 ans	A vérifier après étude approfondie (TRL9)
<i>Quelles sont les contraintes financières de réalisation de l'hydrophone ?</i>	
Montant < 1000 €	≈ 683 €
<i>Quelle est la fiabilité demandée à l'hydrophone ?</i>	
Une bonne fiabilité, notamment une durée de vie de 5 ans	A vérifier lors des premiers tests (TRL4)
<i>Est-ce que des contraintes environnementales, mécaniques ou électriques sont imposées ?</i>	
Pression, corrosion	Pression, corrosion, à vérifier lors des premiers tests (TRL4 et TRL5)

 TABLEAU 1.8 – Tableau des conclusions de l'hydrophone proposé. Questions issues de [Wilson, 1988](#).

Conclusions et perspectives

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux transducteurs et plus particulièrement aux hydrophones. Nous avons présenté le principe de la piézoélectricité régissant leur fonctionnement, les différents éléments qui constituent un hydrophone, en considérant les milieux de déploiement ainsi que les principales caractéristiques qui les définissent (sensibilité, directivité ...). Nous avons présenté une liste des hydrophones disponibles sur le marché et des brevets d'invention à disposition.

A partir d'hydrophones ou de céramiques à notre disposition, nous avons essayé de modéliser les réponses de ces transducteurs en termes de sensibilité à l'émission et à la réception, à l'aide du logiciel multi-physiques COMSOL. Les résultats obtenus montrent une bonne estimation des ordres de grandeur des niveaux générés et des fréquences de résonance. Néanmoins, pour la sensibilité à l'émission, sur les deux exemples étudiés, l'un montrait un décalage de la fréquence de résonance de 2 kHz. Les modélisations de la sensibilité à la réception ont montré une sous-estimation des niveaux des courbes de la sensibilité. Ce dernier point peut s'expliquer par le fait que les modélisations ne prennent pas en compte l'intégralité des éléments qui contraignent la céramique. Néanmoins, afin de proposer le schéma d'un hydrophone, nous nous sommes servis des modèles développés pour estimer ses caractéristiques en terme de fréquences de résonances, à plusieurs kilohertz, et de directivité.

Nous avons développé les étapes, contraintes et questions liées à la construction et au choix des matériaux (contraintes de déploiement, disponibilité des pièces, ordre de prix ...) afin de proposer le schéma d'un hydrophone, de maturité technologique TRL3 sur 9. La conception répond à la contrainte principale d'une grande immersion et respecte le budget défini, malheureusement la contrainte de stabilité à basses fréquences n'a pas pu être vérifiée car les modélisations avec COMSOL ne nous permettent pas de descendre en-dessous de 10 Hz. Au-dessous, les modèles ne convergent pas vers une solution. Du point de vue de la physique des matériaux, l'élément piézoélectrique sera sensible aux basses fréquences, mais il sera nécessaire de prendre en compte l'électronique associée à l'hydrophone, notamment l'étage de conditionnement permettant de définir le rapport signal à bruit car l'électronique peut être instable à ces fréquences.

La principale perspective de ce travail, est de fabriquer un prototype de l'hydrophone proposé et de vérifier les caractéristiques estimées avec les modélisations grâce à des tests en laboratoire. Il sera également nécessaire de concevoir une carte électronique d'acquisition adaptée à l'hydrophone. Nous pourrions étudier la réponse de l'hydrophone à l'aide d'une des deux méthodes de calibration d'hydrophone que nous allons développer en chapitre 2 de cette thèse.

Chapitre 2

Calibration d'hydrophone à basses fréquences

Sommaire

Introduction	73
I Les méthodes de calibration d'hydrophone	75
1 Dimensionnement d'une cuve de calibration d'hydrophone	75
2 Méthodes de calibration à hautes fréquences	77
a Calibration par comparaison en champ libre	77
b Calibration par réciprocité en champ libre	78
c Exemple des calibrations de Bruël & Kjaer	79
i Calibration de 50 Hz à 4 kHz	79
ii Calibration de 3 kHz à 100 kHz	79
3 Méthodes de calibration à basses fréquences	80
a Méthode de calibration par excitation hydrostatique	80
b Méthode de calibration par axe pivotant	83
c Méthode de calibration par réciprocité du coupleur acoustique . .	84
d Méthode de calibration par déplacement vertical	85
e Méthode de calibration par compensation piézoélectrique	86
f Méthode de calibration par pistonphone	87
g Méthode de calibration par colonne vibrante	88
II Développement d'une méthode dynamique de calibration d'hydrophone	
à basses fréquences	91
1 Protocole expérimental	92
2 Principe mathématique	96
a Signal d'entrée théorique	97
b Signal de sortie	97
c Modélisation du signal de sortie	98
3 Résultats	100
4 Conclusions	101
III Développement d'une méthode statique de calibration d'hydrophone	
à basses fréquences	103
1 Protocole expérimental	103
2 Principe mathématique	106
a Fonction de transfert d'un système	106
b Détermination des pôles et zéros du système d'étude	110
3 Modélisation des pôles et zéros par le programme «polezero»	113
4 Résultats	116
5 Conclusions et discussion	119
Conclusions	123

Introduction

Suivant les domaines d'applications des hydrophones, de l'étude des ondes téléseismiques (Simons *et al.*, 2006) à l'écoute météorologique (Nystuen et Farmer, 1989) ou de la recherche de mines, leurs bandes de fréquences varient du Hertz à plusieurs mégahertz. Le domaine audible de l'oreille humaine perçoit en moyenne des ondes dont la bande de fréquences se trouve entre 20 Hz et 20 kHz. Les ondes dont les fréquences sont inférieures à 20 Hz définissent le domaine infrasonore, dont l'utilité principale est d'étudier la Terre, des tremblements de terre à la surveillance des activités volcaniques ou au respect du «Limited Test Ban Treaty» (LTBT) sur les essais nucléaires. Le domaine audible permet également de définir le domaine ultrasonore, dont les ondes ont une fréquence supérieure à 20 kHz et dont l'utilisation se fait principalement dans le domaine médical et militaire. La figure 2.1 ci-dessous, illustre les principaux domaines utilisant des hydrophones et leurs bandes de fréquences associées (Marage et Mori, 2009 et Scherbaum, 2001).

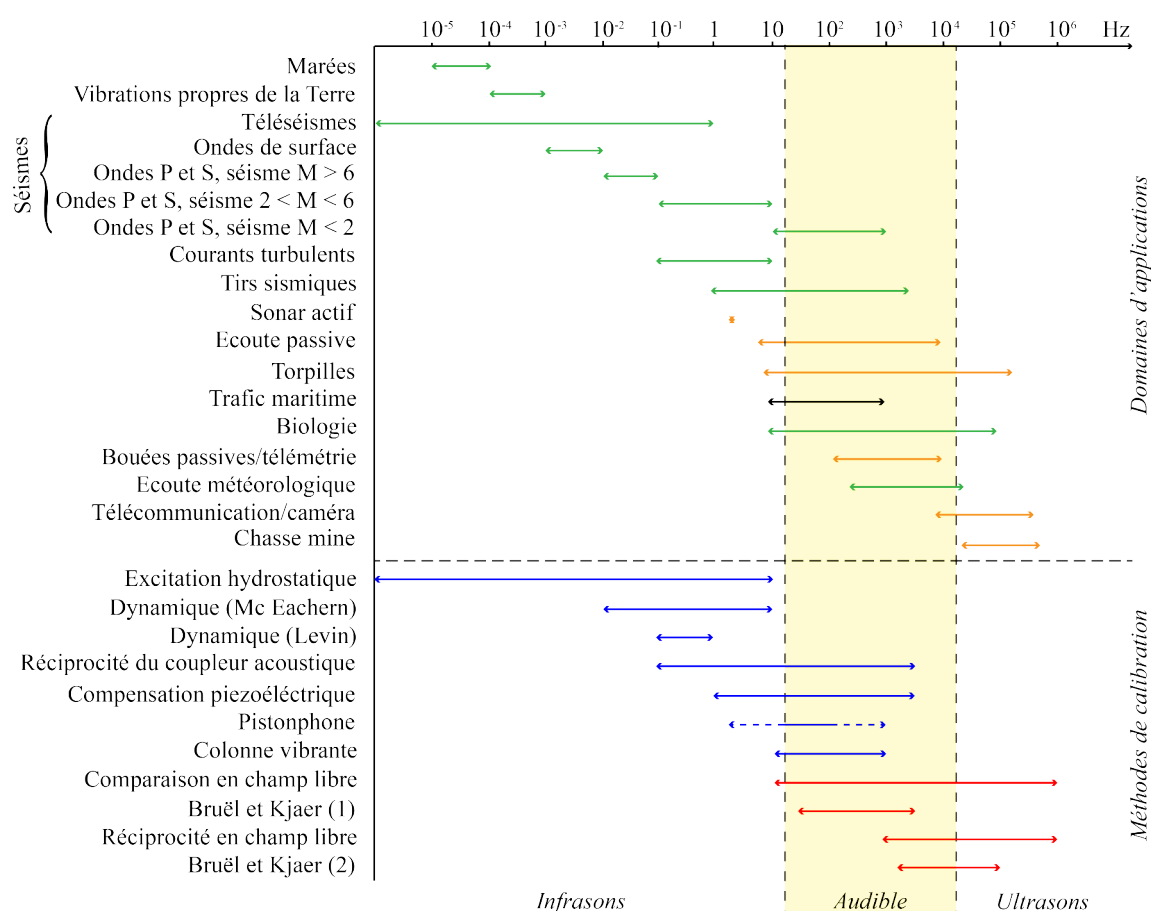


FIGURE 2.1 – Exemples de domaines scientifiques (vert) et militaires (orange) utilisant des hydrophones pour des applications acoustiques et leurs bandes de fréquences associées. Au-dessous, sont inventoriées les méthodes de calibration associées, à basses fréquences (bleu) et hautes fréquences (rouge). Modifié d'après Marage et Mori, 2009, Scherbaum, 2001.

Une si large bande de fréquences nécessite des méthodes de calibration qui sont fonction de l’ordre de grandeur fréquentiel considéré. Dans la littérature, de nombreux articles renseignent sur les techniques de calibration à hautes et ultra hautes fréquences, notamment dans le domaine médical, telles que les méthodes par réciprocité ou substitution (kHz et MHz, Koch et Wilkens, 2004, Radulescu *et al.*, 2003, Smith et Bacon, 1990, Veledar, 2009) mais relativement peu documentent une méthode généralisée de calibration à basses fréquences (< 20 Hz).

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la calibration d’hydrophone à très basses fréquences dans le cadre du projet GLOBALSEIS, car l’étude des téléseismes place la bande d’intérêt au-dessous de 2 Hz (figure 2.1). La réponse instrumentale de l’hydrophone utilisé sur les flotteurs MERMAID, le Rafos II, n’est pas communiquée par le fabricant au-dessous de 5 Hz. Afin d’étudier la réponse de l’hydrophone dans cette gamme de fréquences, nous avons proposé une première méthode de calibration initiée lors d’un stage de Master (Joubert, 2011). La méthode proposée n’ayant pu être validée au terme du stage, notamment à cause d’un problème de non répétabilité des signaux, nous reprenons ici cette méthode, que nous menons à son terme. Dans le temps imparti à la finalisation de cette méthode, nous avons tiré profit du développement de la carte électronique des flotteurs MERMAID pour concevoir une nouvelle méthode de calibration, en proposant une étude de la chaîne d’acquisition complète : l’hydrophone associé à la carte électronique. De cette façon, en fonction du souhait de futurs potentiels utilisateurs, l’hydrophone peut être étudié en temps que capteur seul, grâce à la première méthode de calibration et/ou associé à une carte électronique, grâce à la seconde méthode.

Après un état de l’art sur les différentes méthodes de calibration d’hydrophone à hautes et basses fréquences, nous présenterons successivement ces deux méthodes, ainsi que la correction de signaux sismiques acquis dans le cadre de la deuxième méthode. Cette correction nous permet de faire un parallèle entre les amplitudes des signaux enregistrés par les flotteurs MERMAID et leurs équivalents en termes de variations de la pression en pascals.

I. Les méthodes de calibration d'hydrophone

Le paramètre fondamental définissant un hydrophone est sa sensibilité à la réception (S_h en V/Pa). Elle se définit comme le rapport de la tension générée par l'élément piézoélectrique de l'hydrophone (U) en réponse à une pression (P) suivant les équations 1.21 et 1.22.

Dans des conditions optimales de calibration, la sensibilité doit satisfaire la condition de champ libre et être réalisée dans un environnement de test à faible bruit ambiant. Il devient alors difficile de calibrer des hydrophones en milieu naturel, en lacs ou bassins, les bruits environnementaux ne pouvant être négligés. Des méthodes de calibration en cuve ou caisson ouvert / fermé ont alors été développées. Les dimensions des cuves de calibration étant inversement proportionnelles à la fréquence d'étude, plus on souhaite descendre bas dans les fréquences plus la taille de la cuve doit être importante.

1. Dimensionnement d'une cuve de calibration d'hydrophone

En s'inspirant de la démarche de [Bobber, 1970](#) et des laboratoires Bruël & Kjaer ([Levin, 1973](#)), il est possible d'obtenir les critères de dimensionnement d'une cuve de calibration pour les hautes fréquences. Dans cette démarche, la longueur d'onde d'étude (λ), la durée du signal envoyé (τ) ainsi que la distance entre l'hydrophone à calibrer et un émetteur (d) sont pris en compte.

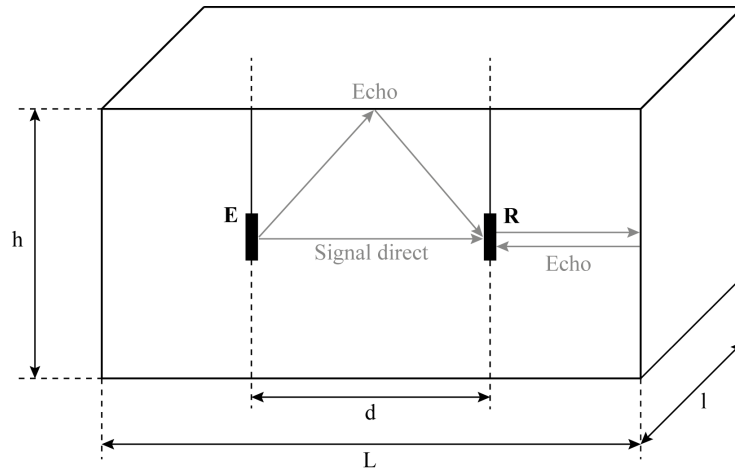


FIGURE 2.2 – Dimensionnement d'une cuve de calibration pour les hautes fréquences. Modifié d'après [Levin, 1973](#).

Considérons une cuve de mesure illustrée en figure 2.2, de longueur L , largeur l , hauteur h ainsi qu'une distance entre l'émetteur (E) et le récepteur (R), d et une célérité c du son dans l'eau égale à 1430 m/s. La distance entre le projecteur (émetteur) et l'hydrophone se définit généralement par

la relation :

$$d = 5 a \quad (2.1)$$

La valeur de a représente la plus grande dimension de l'hydrophone à calibrer. En prenant comme exemple l'hydrophone Rafos II, de plus grande dimension $a = 0,07 \text{ m}$, nous obtenons une distance émetteur-récepteur de $d = 0,35 \text{ m}$. Afin de ne pas perturber les mesures de l'hydrophone par des réflexions d'ondes sur les parois de la cuve de calibration, il est nécessaire d'avoir un temps d'émission du signal (τ) de l'émetteur (E) suffisamment bref et une taille de cuve de mesure suffisamment grande.

Afin d'éviter la perturbation d'une onde réfléchie entre l'hydrophone (R) et l'émetteur (E), le signal ne doit pas excéder un temps τ :

$$\tau \leq \frac{2d}{c} \quad (2.2)$$

Afin de limiter les ondes réfléchies sur les parois de la cuve, le signal ne doit pas dépasser le temps défini par l'équation 2.3 et la distance (d_{hp}) entre ces deux éléments doit respecter les dimensions définies par :

$$\tau \leq \frac{L - d_{hp}}{c} \quad (2.3)$$

En considérant, par exemple, un pulse de $\tau = 1 \text{ s}$, on obtient :

$$d_{hp} = \frac{c \tau}{2} = \frac{1430}{2} = 715 \text{ m} \quad (2.4)$$

Afin de limiter les ondes réfléchies sur les surfaces hautes et basses du bassin, le signal ne doit pas dépasser le temps et la distance (d_{hs}) définis ci-dessous :

$$\tau \leq \frac{\sqrt{h^2 + d_{hs}^2} - d}{c} \quad (2.5)$$

$$d_{hs} = \frac{d + c \tau}{2} = \frac{0,35 + 1430}{2} = 715,18 \text{ m} \quad (2.6)$$

Enfin, les dimensions générales de la cuve sont définies par l'équation 2.7 pour la longueur et l'équation 2.8 pour la hauteur :

$$L = d + c \tau = 0,35 + 1430 \times 1 = 1430,35 \text{ m} \quad (2.7)$$

$$h = \sqrt{(d + c \tau)^2 - d^2} = \sqrt{(0,35 + 1430 \times 1)^2 - 0,35^2} = 1430,35 \text{ m} \quad (2.8)$$

On remarque, dans le cas des basses fréquences, qu'une calibration en conditions réelles est difficilement réalisable en laboratoire ou reproductible dans la nature. Afin de s'affranchir des ondes

réfléchies sur les parois, les dimensions de la cuve doivent être très grandes.

Les bassins de calibration sont principalement utilisés dans le cadre de calibration à hautes fréquences, notamment dans les domaines du kilohertz ou mégahertz. Nous pouvons citer comme exemple, le laboratoire UAL¹ de l'institut acoustique de Rome avec une cuve de 6 m de longueur, 4 m de largeur, 5,5 m de profondeur et dont la bande de fréquence d'étude est de 5 à 300 kHz (Buogo *et al.*, 2008).

Dans le cas des basses fréquences, des méthodes alternatives ont été proposées, notamment l'utilisation de cuve anéchoïque permettant de diminuer les ondes réfléchies et ainsi de pouvoir travailler sur des cuves de dimensions plus faibles.

2. Méthodes de calibration à hautes fréquences

La calibration des hydrophones est soumise aux réglementations européennes et françaises, suivant la norme AFNOR NF EN 60565 (AFNOR, 2007). On distingue principalement deux types de calibration d'hydrophone couramment utilisées à hautes fréquences, par réciprocité et par comparaison. A cela s'ajoute deux méthodes spécifiques à société Bruël & Kjaer.

a. Calibration par comparaison en champ libre

La calibration par comparaison en condition de champ libre s'applique à la bande de fréquences de 10 Hz à 1 MHz (figure 2.1, Trott, 1968). Deux transducteurs sont nécessaires, un projecteur et un transducteur étalon (dit «réciproque», soit hydrophone soit projecteur). Dans le cas du couple projecteur-hydrophone étalon, le projecteur émet un signal dans le milieu qui est enregistré par l'hydrophone étalon (H1). Ce dernier est ensuite remplacé par l'hydrophone à calibrer (H2). Le rapport des tensions (U_{PH1} , U_{PH2}) des deux hydrophones correspond alors au rapport de leurs sensibilités à la réception (S_{H1} , S_{H2}) :

$$\frac{U_{PH1}}{U_{PH2}} = \frac{S_{H1}}{S_{H2}} \quad (2.9)$$

Dans le cas du couple projecteur-projecteur étalon, on utilise la réponse à l'émission du projecteur (S_I), la mesure de courant (I_p) ou de la tension du projecteur ainsi que la distance (d) entre les deux éléments. La sensibilité à la réception de l'hydrophone à calibrer est alors définie par la mesure

1. Underwater **A**coustic **L**aboratory

de sa tension en circuit ouvert (U_{PH}) :

$$S_h = \frac{d U_{PH}}{S_I I_P} = \frac{d |Z_{PH}|}{S_I} \quad (2.10)$$

Avec Z_{PH} l'impédance électrique de transfert entre le projecteur et l'hydrophone.

b. Calibration par réciprocité en champ libre

La méthode de calibration par réciprocité s'applique à la bande de fréquences de 1 kHz à 1 MHz (figure 2.1, Bobber, 1988, Golenkov et Pavlov, 1969, Bobber, 1966, Sims et Henriquez, 1964, Brandt, 1958, Mermoz, 1958, Sabin, 1956, Cartensen, 1947, Primakoff et Foldy, 1947, Ebaugh et Mueser, 1947, Foldy et Primakoff, 1945). Trois transducteurs sont utilisés : un transducteur utilisé comme projecteur, un transducteur réciproque et l'hydrophone à calibrer (figure 2.3). La mesure de la sensibilité de l'hydrophone s'effectue en condition de champ libre et est réalisée à l'aide de la mesure des modules de l'impédance électrique de transfert entre chaque couple : projecteur-hydrophone (PH), projecteur-transducteur réciproque (PT) et transducteur réciproque-hydrophone (TH).

La sensibilité de l'hydrophone est définie par :

$$S_h^2 = \frac{2 d_1 d_3}{\rho f d_2} \frac{|Z_{PH}| |Z_{TH}|}{|Z_{PT}|} \quad (2.11)$$

Avec ρ la densité de l'eau de la cuve de mesure et f la fréquence d'étude.

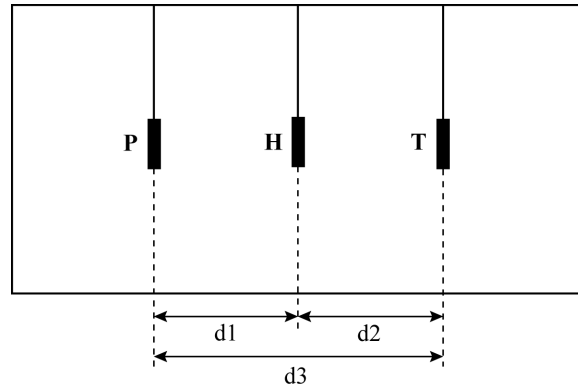


FIGURE 2.3 – Méthode de calibration par réciprocité en champ libre vue en coupe. Le dispositif comprend un projecteur (P), un hydrophone (H) et un transducteur (T). Les distances d_1 , d_2 et d_3 représentent respectivement les distances : projecteur-hydrophone (PH), transducteur réciproque-hydrophone (TH) et projecteur-transducteur réciproque (PT). Modifié d'après AFNOR, 2007.

c. Exemple des calibrations de Bruël & Kjaer

L'entreprise Bruël & Kjaer, référence dans le domaine hydrophonique, propose sur leur gamme d'hydrophones, les calibrations suivantes :

i. Calibration de 50 Hz à 4 kHz

En considérant que l'impédance de radiation d'un hydrophone est négligeable, la sensibilité devient la même dans l'air que dans l'eau, permettant ainsi de travailler en chambre anéchoïque de plus petites dimensions qu'un bassin de calibration ([Levin, 1973](#)).

Dans la méthode proposée (figure 2.4), un microphone M(1) est placé en face d'un hydrophone à calibrer (H). Un deuxième microphone M(2) est placé proche de l'hydrophone pour maintenir un niveau de pression sonore constant sur l'hydrophone. Les variations de pression sonore subies par l'hydrophone en réponse au microphone M(1) sont alors enregistrées et étudiées.

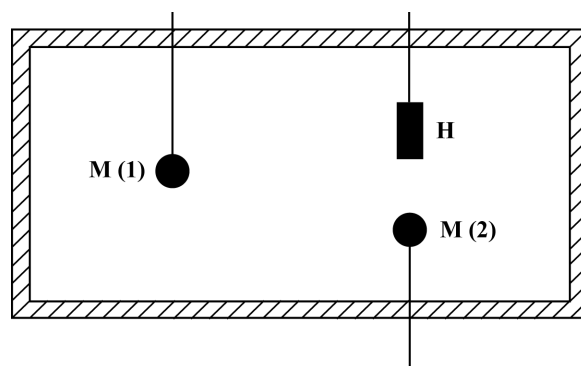


FIGURE 2.4 – Méthode de calibration en chambre anéchoïque. Le dispositif comprend un hydrophone (H) et deux microphones (M). Modifié d'après [Levin, 1973](#).

ii. Calibration de 3 kHz à 100 kHz

Pour les hydrophones utilisés dans la bande de fréquences de 3 à 100 kHz, la société Bruël & Kjaer propose une méthode de calibration utilisant un hydrophone calibré par réciprocité comme émetteur (figure 2.2). Un front d'ondes, conditionné par un générateur de fréquences, est envoyé à l'hydrophone émetteur. La durée et le cycle de ce front peuvent être réglés. Le front est amplifié par un amplificateur de puissance avant d'être injecté à l'hydrophone émetteur. Le signal est émis et enregistré par l'hydrophone à calibrer. Il est également amplifié à la sortie de l'hydrophone à calibrer.

La sensibilité à la réception de l'hydrophone à calibrer se définit alors par :

$$S_h^2 = \frac{u^2 d^2}{U^2 S_v^2} \quad (2.12)$$

Avec U la tension appliquée à l'hydrophone émetteur (V), S_v sa sensibilité à l'émission (Pa/V) et u la tension enregistrée par l'hydrophone à calibrer (V).

En passant en échelle logarithmique, on obtient :

$$20 \log S_h(dB) = -20 \log U - 20 \log S_v + 20 \log d + 20 \log u \quad (2.13)$$

3. Méthodes de calibration à basses fréquences

A la différence des méthodes de calibration à hautes fréquences, il n'existe pas de méthode couramment utilisée à basses fréquences. Plusieurs méthodes de calibration ont été développées, en caisson/bassin ouvert ou fermé avec divers procédés. La majeure partie de ces méthodes sont le fruit de brevets d'invention déposés entre les années 1950 et 1990. Leur nombre peut s'expliquer par le fait que l'utilisation des basses fréquences a été longtemps le domaine privilégié des applications militaires, chacune des méthodes ayant pu être développée pour satisfaire un besoin spécifique.

Nous allons dans cette partie, exposer les différentes méthodes de calibration d'hydrophone à basses fréquences que nous avons pu étudier et dont le tableau 2.1 récapitule les principales caractéristiques.

a. Méthode de calibration par excitation hydrostatique

Le principe de la calibration par excitation hydrostatique a été développé par [Golenkov, 1972](#) et s'applique aux hydrophones dans la bande de fréquences infrasonores, entre 0 et 20 Hz (figure 2.1). Dans cette méthode (figure 2.5), l'hydrophone est placé dans une chambre de mesure et connecté par l'intermédiaire d'un tube flexible à un récipient présentant une surface libre de contact avec l'air. Ce récipient est relié à un vibreur qui génère un mouvement oscillatoire sinusoïdal de l'eau transmis à l'hydrophone. L'hydrophone est relié à un voltmètre mesurant les variations de tension perçues par l'hydrophone.

Le vibreur génère des ondes dont l'amplitude est optimisée pour ne pas induire de forces de volume et conserver l'inertie du milieu. Les oscillations permettent de déterminer l'amplitude de la pression

Méthodes	Inventeurs	Type	Bande de fréquences	Difficulté de réalisation	Caisson / Cuve	Transducteurs supplémentaires requis		
						Hydrophone	Transducteur	Projecteur
Excitation hydrostatique	Golenkov, 1972	Statique	0 à 20 Hz	+	Fermé	✗	✗	✗
Axe pivotant	Mc Eachern, 1984	Dynamique	5 à 10 Hz	++	Ouvert	✓	✗	✗
Réciprocité du coupleur acoustique	McMahon, 1964 Sims et Henriquez, 1964 repris par Zalesak, 1999a Zalesak, 1999b	Statique	0,1 à 5 Hz	++	Fermé	✗	✓	✓
Déplacement vertical	Levin, 1973	Dynamique	0,1 à 1 Hz	+	Ouvert	✗	✗	✗
Compensation piezoélectrique	Trott et Lide, 1955 Golenkov et Pavlov, 1967 Golenkov et Likhachev, 1994	Statique	1 à 5 Hz	++	Fermé	✓	✗	✓
Pistonphone	Bobber, 1988	Statique	qlq Hz à qlq 100 Hz	++	Fermé	✓	✗	✗
Colonne vibrante	Schloss <i>et al.</i> , 1965	Statique	10 Hz à 1 kHz	+++	Ouvert / Fermé	✗	✗	✗

TABLEAU 2.1 – Caractéristiques des principales méthodes de calibration d'hydrophone à basses fréquences. Le sigle ✓ représente la nécessité d'utiliser le/les transducteur(s) associé(s) et ✗ leur(s) non-utilisation(s).

hydrostatique exercée sur l'hydrophone suivant l'équation :

$$P_0 = H_0 \rho g \quad (2.14)$$

P_0 : amplitude de la variation de pression subie par l'hydrophone (Pa),

H_0 : amplitude de l'oscillation dans le récipient (m),

ρ : masse volumique de l'eau (kg/m³),

g : accélération de la pesanteur (m/s²).

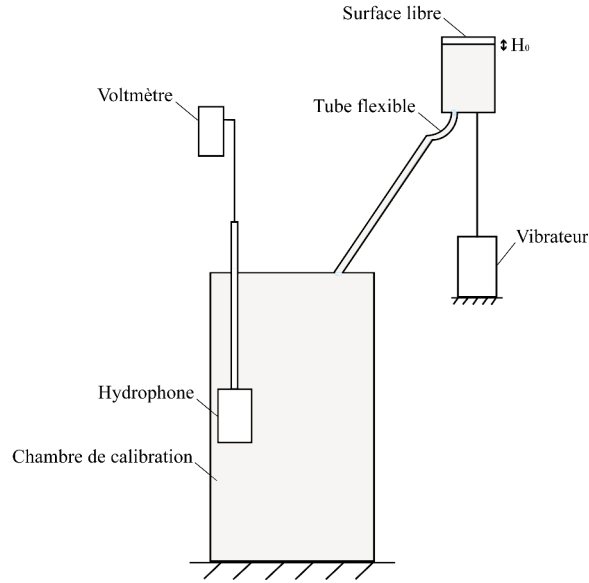


FIGURE 2.5 – Méthode de calibration de [Golenkov, 1972](#). Le dispositif comprend une chambre de mesure, un tube flexible, un récipient ouvert, un vibreur, un hydrophone et un voltmètre. Modifié d'après [Golenkov, 1972](#).

L'amplitude des oscillations générées à la surface du récipient permet de déterminer la sensibilité de l'hydrophone, par le rapport de la tension enregistrée par l'hydrophone et la pression hydrostatique agissant en entrée sur l'hydrophone (équation 1.21).

L'équation 2.14 est valable pour des fréquences de 0 à 0,5 Hz. Au-delà, il est nécessaire d'inclure l'influence de la résonance de Helmholtz, l'inertie de l'eau dans le récipient et le tube flexible. L'amplitude de la pression hydrostatique devient :

$$P_0 = H_0 \rho g \mid K_0 \mid \left(1 - \frac{\omega^2}{g} H_e \right) \quad (2.15)$$

Avec H_e la hauteur (m) équivalente influencée par l'inertie de l'eau et $|K_0|$ le coefficient de majoration

de la pression hydrostatique :

$$|K_0| = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega^2}{\omega_r^2}\right) \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{Q \omega_r}\right)^2} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_r^2}\right)^2} \quad (2.16)$$

Avec Q le facteur de qualité mécanique et ω_r la fréquence de résonance du système. Le calcul de la sensibilité de l'hydrophone à calibrer est alors défini par le rapport de la tension en circuit ouvert de l'hydrophone et la pression dans la chambre de mesure (équation 1.21).

b. Méthode de calibration par axe pivotant

La méthode de calibration par axe pivotant développée par [Mc Eachern, 1984](#) s'applique aux hydrophones dans une bande de fréquences de 5 à 10 Hz et peut s'appliquer à de plus basses fréquences par extrapolation, jusqu'à 0,01 Hz (figure 2.1).

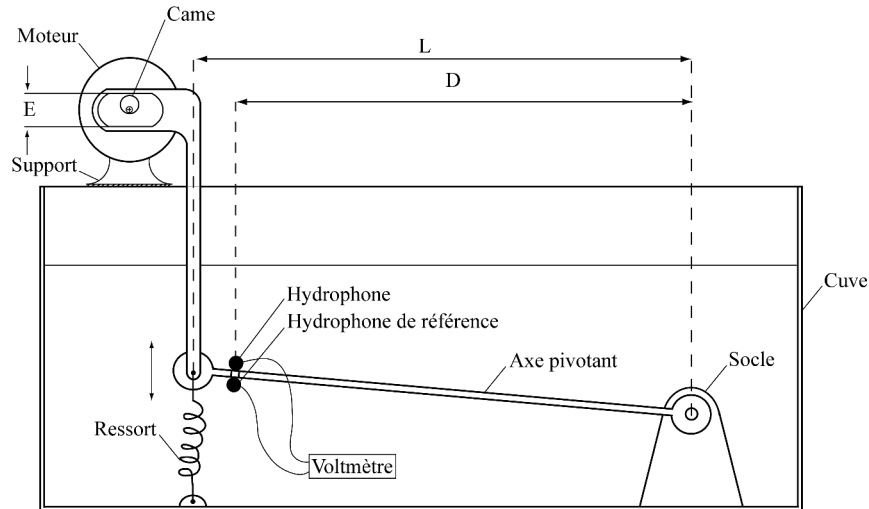


FIGURE 2.6 – Méthode de calibration par axe pivotant, [Mc Eachern, 1984](#). Le dispositif comprend une cuve de mesure, un axe pivotant, un socle, un hydrophone à calibrer, un hydrophone étalon, un moteur, un support, un ressort et une came. Modifié d'après [Mc Eachern, 1984](#).

Le principe de calibration (figure 2.6) est composé d'une cuve de mesure de surface libre remplie d'eau dans laquelle est immergé un axe pivotant. Cet axe pivotant est connecté, d'un côté à un socle fixé rigidement à la cuve et de l'autre côté à un système de ressort de telle sorte que l'hydrophone à calibrer et un hydrophone étalon puissent, sous l'action d'un moteur, se déplacer suivant un mouvement oscillatoire vertical. Le moteur est placé sur un support positionné au-dessus de la cuve de mesure et sa vitesse de rotation peut être ajustée. Un ressort permet d'amortir le déplacement des hydrophones, limitant ainsi les rebonds. Le déplacement de ces derniers entraîne un changement

de la pression hydrostatique (ΔP_h) en fonction de l'amplitude des mouvements suivant la relation :

$$\Delta P_h = E \frac{D}{L} \quad (2.17)$$

E : représente l'excentricité de la came (in),

D : représente la distance entre les hydrophones et le centre du support (in),

L : représente la longueur de l'axe pivotant (in).

Les deux hydrophones sont connectés à un voltmètre permettant de comparer les niveaux enregistrés en réponse à un même stimuli.

c. Méthode de calibration par réciprocité du coupleur acoustique

Cette méthode utilise le même principe de fonctionnement que la méthode de calibration par réciprocité en champ libre à hautes fréquences. Elle est basée sur la mesure des modules des impédances de transfert et s'applique pour des fréquences de 0,1 Hz à 5 kHz (figure 2.1, Zalesak, 1999a, Zalesak, 1999b, Sims et Henriquez, 1964, McMahon, 1964). A la différence de la méthode par réciprocité en champ libre, dans celle-ci un transducteur, un projecteur et un hydrophone sont placés dans une chambre fermée, appelée coupleur (figure 2.7). Les mesures des modules des impédances électriques sont mesurées pour les couples projecteur - hydrophone (Z_{PH}), transducteur - hydrophone (Z_{TH}) et projecteur - transducteur (Z_{PT}).

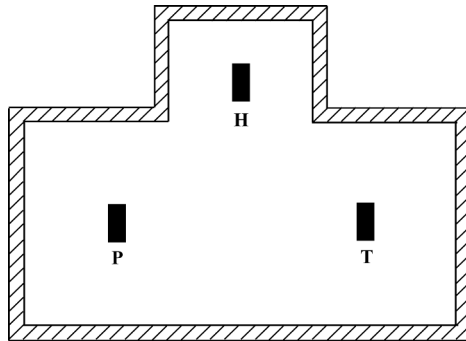


FIGURE 2.7 – Méthode de calibration par réciprocité du coupleur acoustique. Le dispositif comprend un hydrophone (H), un projecteur (P) et un transducteur (T). Modifié d'après Zalesak, 1999a, Zalesak, 1999b.

La sensibilité de l'hydrophone à calibrer est calculée suivant :

$$S_h^2 = \omega C_t \frac{|Z_{PH}| |Z_{TH}|}{|Z_{PT}|} \quad (2.18)$$

Avec ω la fréquence angulaire et C_t l'élasticité est définie par :

$$C_t = \frac{V_f}{\rho_f c_f} \quad (2.19)$$

Avec V_f le volume de fluide, ρ_f et c_f respectivement la densité et la célérité du fluide.

d. Méthode de calibration par déplacement vertical

La méthode de calibration développée par [Levin, 1973](#) permet de calibrer des hydrophones dans la bande de fréquences de 0,1 à 1 Hz (figure 2.1). L'hydrophone à calibrer est immergé dans un bac d'eau (figure 2.8) et fixé rigidement le long d'un axe vertical relié à un montage mécanique. Ce montage mécanique est composé d'un disque actionné par un moteur qui, grâce à un système de butoirs évoluant le long d'un axe horizontal, permet de générer un mouvement oscillatoire de l'hydrophone dans l'eau. Une fois que l'épingle est arrivée à la fin du sillon, l'hydrophone est à son maximum de position haute ou basse, l'épingle parcourt alors l'axe horizontal en sens inverse jusqu'à atteindre l'autre butoir entraînant l'hydrophone dans un mouvement inverse. En répétant cette opération successivement l'hydrophone dessine un mouvement oscillant dans l'eau au cours du temps. En faisant varier la profondeur de l'hydrophone, on induit une variation de la pression hydrostatique.

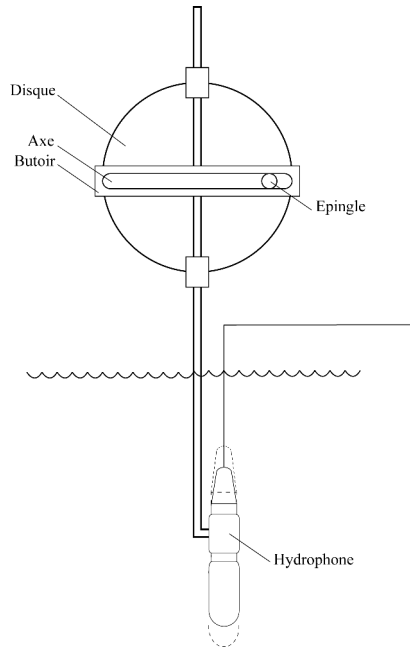


FIGURE 2.8 – Méthode de calibration par déplacement vertical ([Levin, 1973](#)). Le dispositif comprend un disque conduit par un moteur, un sillon contenu dans un support qui dessine un axe horizontal et qui contient une épingle contrôlant les mouvements de l'hydrophone à calibrer dans un bac rempli d'eau. L'hydrophone est relié à un oscilloscope. Modifié d'après [Levin, 1973](#).

La sensibilité de l'hydrophone est alors définie par :

$$S_h = \frac{\Delta U}{\Delta h \rho g} \quad (2.20)$$

ΔU : tension mesurée entre deux pics de l'oscilloscope (V),

Δh : déplacement vertical de l'hydrophone dans l'eau (m).

Cette méthode de calibration peut s'effectuer sans limitation de la fréquence supérieure de l'intervalle d'étude, mais elle se trouve limitée par les turbulences et les écoulements laminaires générés par les mouvements de l'hydrophone. La méthode est applicable jusqu'à des fréquences maximales comprises entre 1,5 et 4 Hz (figure 2.1).

e. Méthode de calibration par compensation piézoélectrique

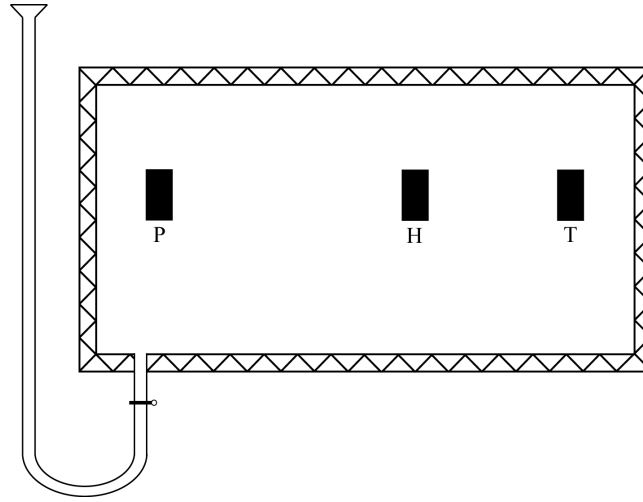


FIGURE 2.9 – Méthode de calibration par compensation piézoélectrique. Le dispositif comprend un projecteur (P), un hydrophone à calibrer (H) et un transducteur (T). Modifié d'après [AFNOR, 2007](#).

La méthode de calibration par compensation piézoélectrique s'applique aux fréquences de 1 Hz à 5 kHz (figure 2.1, [Golenkov et Likhachev, 1994](#), [Golenkov et Pavlov, 1967](#), [Trott et Lide, 1955](#)). L'hydrophone à calibrer est placé dans une chambre fermée remplie d'eau (figure 2.9). Aux extrémités de la chambre sont placés respectivement un projecteur (P) et un transducteur (T). L'amplitude de la pression générée par le projecteur est mesurée à l'aide du transducteur. Un générateur de signaux est connecté simultanément au projecteur et au transducteur. La tension de sortie du transducteur est ajustée sur un niveau zéro. En plaçant l'hydrophone à calibrer proche du transducteur, la pression au niveau du transducteur est égale à :

$$P = K (d_{jk}, E, r) U_c \quad (2.21)$$

Avec K une constante du transducteur caractérisée par le module de l'élément piézoélectrique

(d_{jk}), le module d'Young (E) de l'élément piézoélectrique et r le rayon moyen du transducteur. U_c représente la tension de compensation du transducteur. La variation de l'amplitude de la tension ΔU_c doit être ajustée jusqu'à ce que le déplacement du transducteur soit égal à zéro. On peut ainsi calculer la sensibilité de l'hydrophone avec :

$$S_h = \frac{U}{U_c} \frac{\Delta U_c}{\rho g H_0} \quad (2.22)$$

Avec H_0 l'amplitude vibratoire du niveau d'eau au-dessus du montage, qui permet de déterminer la constante du transducteur.

f. Méthode de calibration par pistonphone

La méthode de calibration par pistonphone (Bobber, 1988) s'applique à une bande de fréquences allant de quelques hertz à plusieurs centaines de hertz (figure 2.1, Bobber, 1988). L'hydrophone à calibrer est placé dans une cuve fermée remplie d'air ou partiellement remplie d'eau (figure 2.10). L'activation d'un piston par un moteur entraîne une variation de pression sinusoïdale sur l'hydrophone. La méthode peut s'utiliser avec l'hydrophone à calibrer seul ou avec un hydrophone étalon supplémentaire. La sensibilité peut ainsi être mesurée de façon absolue ou relative.

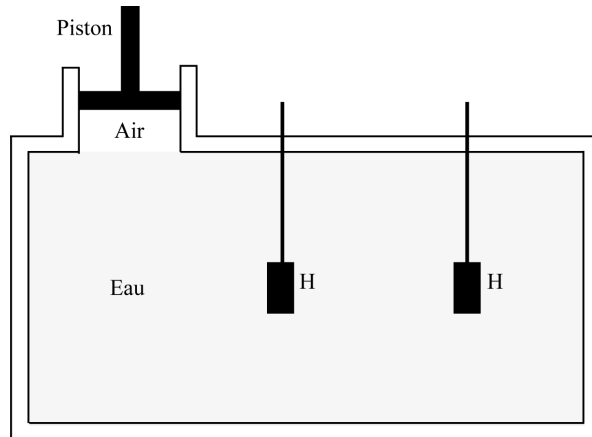


FIGURE 2.10 – Méthode de calibration par pistonphone (AFNOR, 2007). Le dispositif comprend un ou deux hydrophone(s) (H), une chambre et un piston. Modifié d'après AFNOR, 2007.

Dans le cas d'une calibration absolue, la pression peut être mesurée par le produit de l'impédance acoustique Z et de la vitesse de déplacement du volume u :

$$P = u Z \quad (2.23)$$

$$P = i \omega V_D \frac{1}{j \omega C_M} = \frac{V_D}{C_M} \quad (2.24)$$

Avec V_D la variation de volume et C_M l'élasticité du milieu définie par la loi des gaz :

$$C_M = \frac{V_0}{p_0 \gamma} \quad (2.25)$$

Avec V_0 le volume total de l'enceinte, p_0 la pression statique et γ le rapport des chaleurs spécifiques du gaz utilisé.

La sensibilité à la réception se calcule alors en suivant la relation :

$$S_h = \frac{V_0 U_H}{p_0 \gamma V_D} \quad (2.26)$$

A l'aide d'un transducteur étalon, une calibration relative peut être effectuée par comparaison. La sensibilité se calcule alors en utilisant les tensions U_T et U_H , respectivement du transducteur étalon et de l'hydrophone à calibrer ainsi que la sensibilité de l'étalon (S_T) suivant la relation :

$$S_h = \frac{U_H}{U_T} S_T \quad (2.27)$$

g. Méthode de calibration par colonne vibrante

La méthode de calibration par colonne vibrante s'applique aux fréquences de 10 Hz et 1 kHz (figure 2.1, Schloss *et al.*, 1965). Dans cette méthode, l'hydrophone à calibrer est immergé dans une cuve de mesure posée sur un système vibrant. La cuve est remplie de liquide et d'un gaz inerte (figure 2.11, à droite) ou avec une surface supérieure ouverte (figure 2.11, à gauche). Lorsque la cuve est soumise à un mouvement vibratoire, l'hydrophone enregistre les variations de la pression. Dans la première méthode proposée (figure 2.11, à gauche), l'hydrophone est immergé dans une cuve remplie d'un liquide (eau, glycérine ...) et dont la partie supérieure est ouverte. L'hydrophone est maintenu par un câble indépendant de la cuve afin d'éviter un couplage mécanique avec cette dernière. L'hydrophone est connecté à un voltmètre qui enregistre les variations de la tension subies par l'hydrophone en réponse aux variations de la pression. Les vibrations sont générées par le système vibrant couplé mécaniquement à une chambre vibrante grâce à un élément de transmission de vibration. Un accéléromètre est placé dans la partie haute de la chambre, ce qui permet de mesurer l'accélération (\ddot{x}) de la partie basse de la cuve de mesure.

La deuxième méthode proposée (figure 2.11, à droite) est similaire à la première à la différence près que l'accéléromètre est remplacé par un système optique qui permet de mesurer les amplitudes de déplacement (x) que subit l'hydrophone. La cuve de mesure est fermée dans sa partie supérieure par un bouchon résistant à la haute pression. Le câble de connexion de l'hydrophone au voltmètre

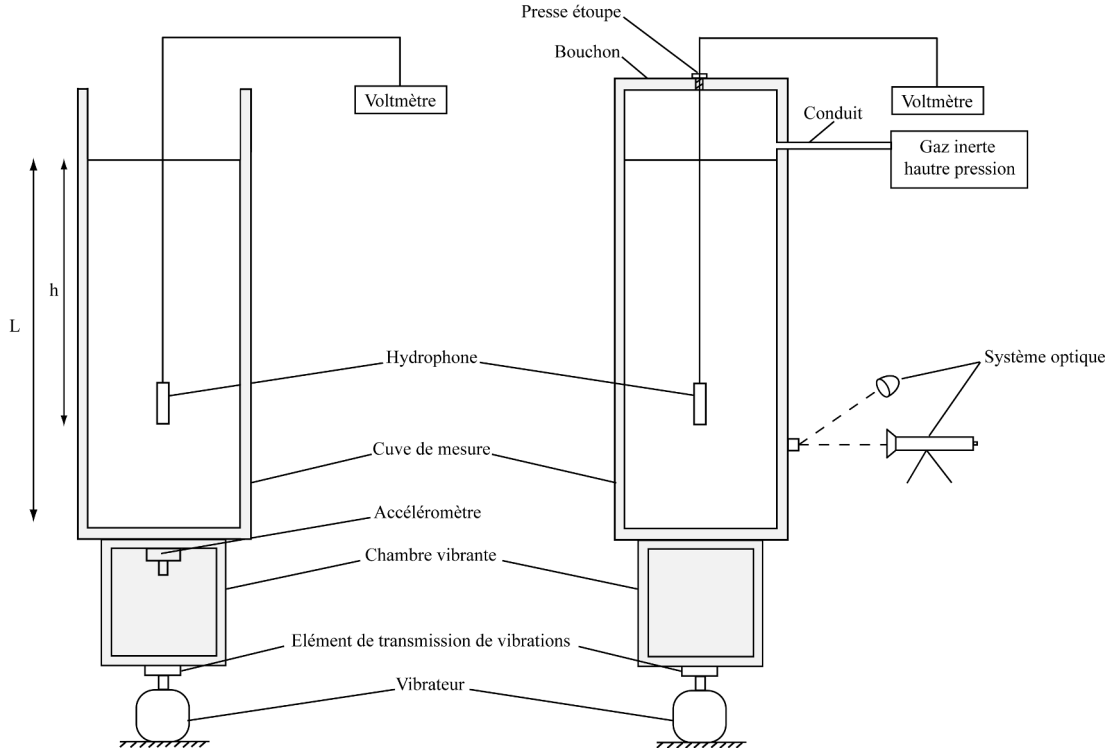


FIGURE 2.11 – Méthode de calibration par colonne vibrante (Schloss *et al.*, 1965). Le dispositif comprend un hydrophone immergé dans une cuve posée sur un système vibrant, composé d'une chambre vibrante reliée par un élément de transmission des vibrations. Un accéléromètre ou un système optique permet de mesurer les vibrations. Dans la méthode de gauche, la cuve de mesure est ouverte dans sa partie supérieure alors que dans la méthode de droite elle est fermée par un bouchon. Modifié d'après Schloss *et al.*, 1965

passé au travers du bouchon grâce à un presse-étoupe. Un gaz à haute pression est introduit dans la cuve de mesure. Le système optique est composé d'une lumière stroboscopique qui dirige un faisceau lumineux dans un réticule. Un microscope est focalisé sur ce dernier afin de percevoir la lumière. Le microscope permet ainsi de voir le déplacement subi par le faisceau de lumière.

En faisant l'hypothèse que le liquide vibre uniformément, la pression instantanée P à la profondeur h est donnée par :

$$P = \rho g x + \rho h \ddot{x} \quad (2.28)$$

x : position moyenne (m),

ρ : masse volumique du liquide dans la cuve (kg/m^3),

\ddot{x} : accélération du liquide (m/s^2),

g : accélération de la pesanteur (m/s^2).

Si les oscillations appliquées au bassin sont sinusoïdales de fréquence angulaire ω , alors l'amplitude

de la pression est liée à l'amplitude de déplacement suivant la relation :

$$P_0 = \rho x_0 (g - \omega^2 h) \quad (2.29)$$

Avec x_0 l'amplitude de déplacement (m).

La sensibilité de l'hydrophone à calibrer peut être calculée suivant la relation :

$$S_h = \frac{U_h}{U_a} \frac{S_a}{\rho h} \frac{\frac{\omega h}{c} \cos \frac{\omega L}{c}}{\sin \frac{\omega h}{c}} \quad (2.30)$$

U_h et U_a : respectivement les tensions de sortie de l'hydrophone et de l'accéléromètre (V),

S_a : sensibilité de l'accéléromètre ($\text{s}^2 \text{V/m}$),

ω : fréquence angulaire (rad/s),

c : célérité de l'eau (m/s),

h : profondeur (m).

II. Développement d'une méthode dynamique de calibration d'hydrophone à basses fréquences

Le développement d'une méthode de calibration d'hydrophone à basses fréquences s'est inscrit dans le cadre du projet GLOBALSEIS (Nolet, 2009, Simons *et al.*, 2009, Simons *et al.*, 2006). Dans ce projet, l'acquisition des ondes P se fait grâce à l'hydrophone Rafos, commercialisé par la société Teledyne Benthos. Cet hydrophone présente la particularité d'avoir une bande de fréquences (de 1 Hz à 10 kHz) permettant l'acquisition des ondes téléseismiques (< 2 Hz, figure 2.1) et de s'adapter facilement à la tête des flotteurs MERMAID.



FIGURE 2.12 – Hydrophone Rafos, type II

Les sensibilités des deux modèles de Rafos commercialisés sont définies respectivement par -201 et -195 dB V/ μ Pa à 20 ° C à 1 m, pour l'hydrophone Rafos I et II (figure 2.12 et tableau 2.2). Cependant, les courbes de sensibilités du Rafos II par exemple (figure 2.13), ne fournissent pas de données sous 5 Hz. La question de la stabilité des sensibilités des Rafos sous cette fréquence s'est donc posée. Cette question est à l'origine du développement de cette méthode. Celle-ci a été initiée au cours d'un stage de Master (Joubert, 2011) et s'est finalisée au cours de cette thèse.

Hydrophone	Rafos I	Rafos II
<i>Caractéristiques générales</i>		
Longueur (cm)	7	7
Diamètre (cm)	1,6	1,6
Poids (g)	25	25
<i>Caractéristiques électriques</i>		
Sensibilité (dB V/ μ Pa à 20 ° C)	-201	-195
Sensibilité (V/Bar à 20 ° C)	8,9	17,8
Capacité (nF à 20 ° C)	14,5	3,5
<i>Utilisation</i>		
Profondeur maximum (m)	1732	1732
Réponse fréquentielle	1 Hz à 10 kHz	1 Hz à 10 kHz

TABLEAU 2.2 – Caractéristiques des hydrophones Rafos I et II, commercialisés par la société Teledyne Benthos.

Dans cette partie, nous exposerons le principe mathématique utilisé ainsi que le protocole expérimental développé en mettant en évidence les améliorations apportées à la méthode initialement

conçue. Nous concluons ensuite sur les résultats obtenus.

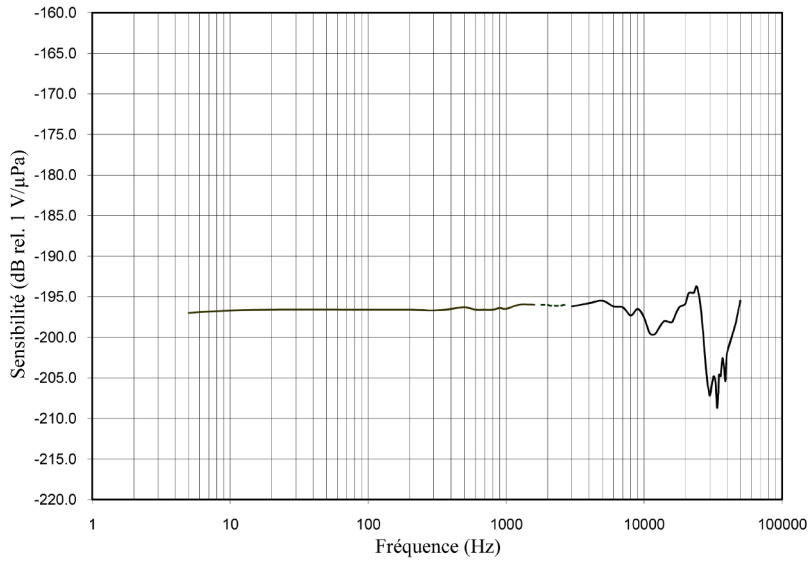


FIGURE 2.13 – Sensibilité de l'hydrophone Rafos II, d'après la société Teledyne Benthos.

1. Protocole expérimental

En instrumentation, la réponse à une impulsion de Dirac est couramment utilisée afin de caractériser un système ([Oppenheim *et al.*, 1983](#)), car cette fonction présente la particularité d'être positive, de courte durée et d'avoir un spectre blanc. En laboratoire, il est difficile de générer une impulsion de Dirac, du fait de l'infinité de son amplitude. La fonction de Heaviside ([Heaviside, 1950](#)), son intégrale dans le domaine temporel, est souvent utilisée en substitution.

Afin d'étudier la réponse instrumentale de l'hydrophone Rafos, nous allons donc recréer mécaniquement une fonction de Heaviside. Pour cela, l'hydrophone à étudier est placé dans une cuve de mesure remplie d'eau. Un principe mécanique permet de le déplacer verticalement afin de générer une augmentation ou une diminution de pression. La mise en place du principe expérimental développé en Master est illustrée en figure [2.14](#) et son évolution au cours de ce travail de thèse en figure [2.15](#).



FIGURE 2.14 – Principe expérimental de calibration développé en Master.

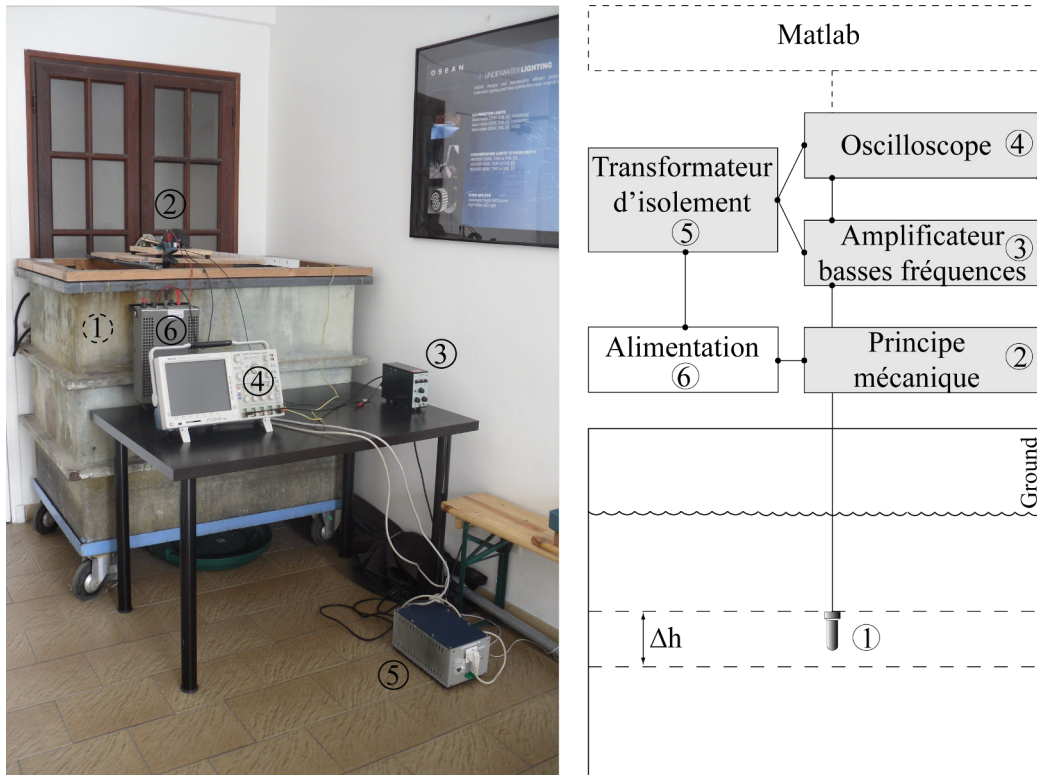


FIGURE 2.15 – Principe expérimental de calibration développé au cours de cette thèse.

Dans le cadre du développement de cette méthode de calibration «dynamique», nous avons utilisé l'hydrophone Rafos I, dont les caractéristiques sont listées dans le tableau 2.2. Dans cette version, afin de générer une variation de pression, l'hydrophone est immergé dans un bac d'eau à une profondeur initiale de 0,29 m (dimension de la cuve : largeur 0,91 m, longueur 1,31 m, hauteur 1,03 m et hauteur d'eau 0,80 cm, figure 2.15). Les bords internes de la cuve sont recouverts de mousse polyuréthane afin de restreindre la réflexion des ondes. L'hydrophone est connecté à un amplificateur de basses fréquences (Type Brüel & Kjaer 2628). La sortie de l'amplificateur est connectée à un oscilloscope (Type Tektronix DPO 4034) depuis lequel sont effectués les enregistrements et stockés sur une carte mémoire avant traitement sous Matlab.

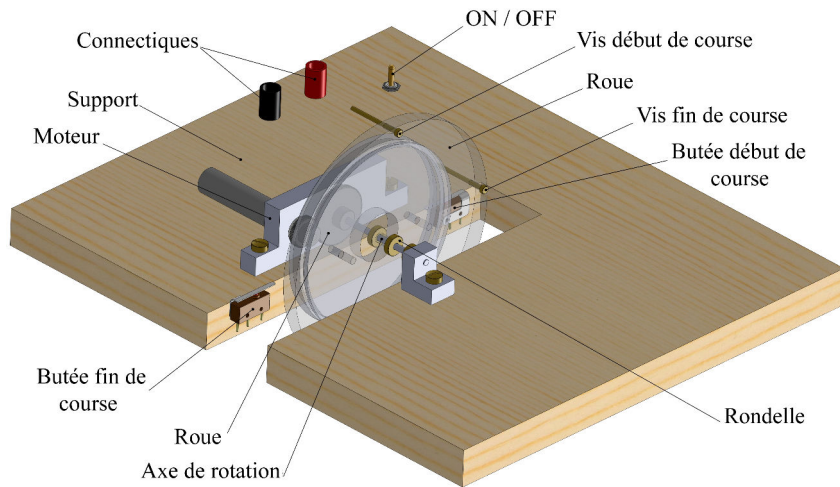


FIGURE 2.16 – Principe mécanique du déplacement de l'hydrophone dans l'eau.

Afin de contrôler la descente de l'hydrophone dans l'eau, le principe mécanique initialement développé a été adapté (figure 2.16). Le principe mécanique est composé de deux roues, une première avec un diamètre de 0,12 m sur laquelle deux butées de début et fin de course sont placées pour définir les 0,1 m de descente souhaitée. Une deuxième roue, d'un diamètre de 0,09 m ayant un canal central creusé de 2 mm, permet de maintenir le câble de l'hydrophone dans une direction verticale. Les roues sont toutes les deux placées sur un axe de rotation connecté à un moteur. Un interrupteur à trois positions permet le déplacement de l'hydrophone dans l'eau dans les directions ascendante et descendante. Afin de respecter une descente d'une longueur de 0,1 m, deux contacts de début et fin de course sont placés de chaque côté du support. Quand l'utilisateur ouvre l'interrupteur, les roues tournent jusqu'à rencontrer le contact de fin de course arrêtant le mouvement de rotation. L'utilisation de ces contacts entraîne l'apparition de bruits sur les signaux enregistrés comme illustrés sur la figure 2.17.a. Au début et à la fin de la descente de l'hydrophone dans l'eau, des rebonds sont visibles proches des secondes 1 et 2 de l'enregistrement. Néanmoins, l'adaptation du principe mécanique a permis une réduction importante des rebonds et oscillations des signaux par rapport

au principe initial (figure 2.17.b).

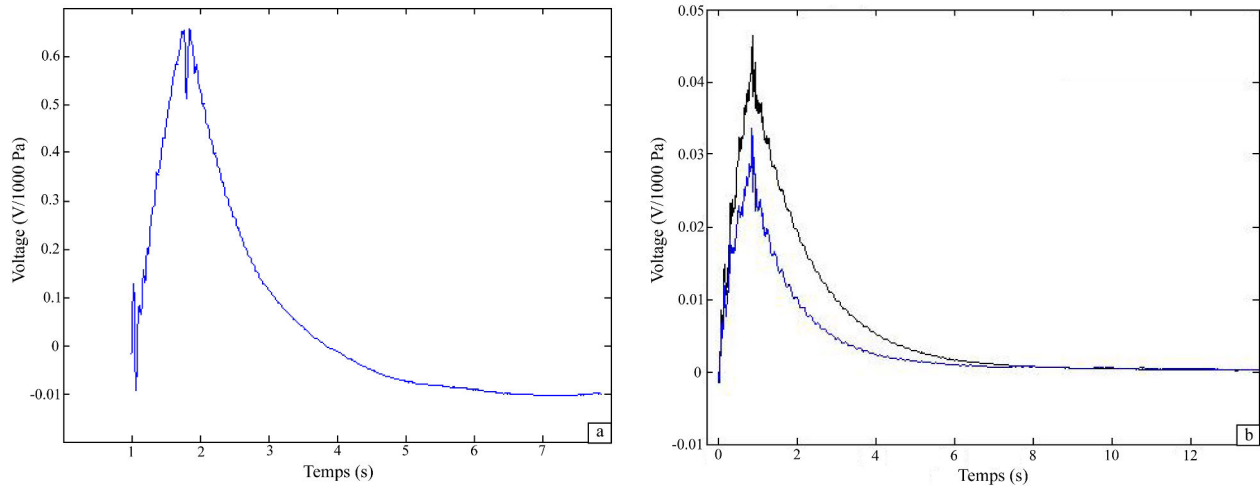


FIGURE 2.17 – Réponse de l'hydrophone Rafos I à une fonction de Heaviside dans le cadre de la méthode «dynamique» adaptée en (a) et initialement développée en (b). La figure (b) présente deux courbes illustrant le phénomène de non répétabilité des signaux que nous avons rencontré lors de la première phase de développement de cette méthode (Joubert, 2011).

La figure 2.17 illustre à gauche l'exemple d'un signal acquis après l'adaptation du principe mécanique et à droite avec la version initiale. On observe désormais la quasi inexistence des oscillations lors de la descente de l'hydrophone dans l'eau. Si l'utilisation des butées de début et fin de course permet de contraindre précisément la longueur de la descente de l'hydrophone dans l'eau, elle induit cependant des rebonds au début et à la fin de la descente. Suivant cette configuration, nous n'avons pas trouvé de moyens effectifs pour limiter ce phénomène de rebonds au contact des butées.

Des conditions expérimentales calmes et un protocole strict de tests sont nécessaires pour garantir une bonne répétabilité des mesures. A cet effet, le moteur alimentant le principe mécanique, l'amplificateur de basses fréquences ainsi que l'oscilloscope sont connectés à un transformateur d'isolement permettant de réduire le bruit électronique. Toutes les mesures sont également réalisées en suivant le protocole de tests établi dans le tableau 2.3.

Temps	Action
t = 0 min	Lancement de l'acquisition
t = 1 min	Déplacement vertical de l'hydrophone
t = 2 min	Arrêt de l'acquisition
t = 3 min	Réinitialisation de la profondeur de l'hydrophone
t = 6 min	Fin de stabilisation / Début d'un nouveau cycle

TABLEAU 2.3 – Protocole de mesures de la méthode de calibration dynamique.

Afin d'identifier la cause de la non répétabilité des expériences, rencontrée au cours des travaux de

Master (figure 2.17.b), des améliorations importantes ont été apportées au principe expérimental initialement développé. Notamment, la cuve de mesure est désormais de taille plus importante et ses parois internes sont recouvertes d'une mousse polyuréthane afin de limiter la réflexion des ondes. La préamplification des données utilise désormais un amplificateur de basses fréquences. L'utilisation d'un transformateur d'isolement permet de limiter le bruit de l'électronique (moteur, amplificateur et oscilloscope). Enfin l'enregistrement des données est réalisé à l'aide d'un oscilloscope et ne se fait plus par l'intermédiaire du système de la carte d'acquisition de l'OBS type Ladybug, ce qui permet de s'affranchir des effets éventuels de l'électronique de l'OBS.

2. Principe mathématique

Afin de définir la réponse instrumentale de l'hydrophone Rafos I, nous lui appliquons mécaniquement une fonction de Heaviside ($\tau = 0$, figure 2.18, courbe bleue) et nous étudions le signal résultant. Le déplacement Δh de l'hydrophone dans l'eau génère une surpression ΔP en moins d'une seconde.

Le temps de descente étant inférieur à une seconde, nous approximations que nous sommes dans le cas d'une fonction de Heaviside (figure 2.18, courbe bleue), bien que mécaniquement nous soyons dans le cas d'une fonction de type «rampe» (figure 2.18, courbe rouge), qui prend en compte un temps τ pour admettre un changement d'état.

En utilisant $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$, $g = 9,804 \text{ m/s}^2$ et $\Delta h = 0,1 \text{ m}$, nous obtenons une augmentation de pression de $\Delta P = 978,4 \text{ Pa}$, soit environ 1000 Pa.

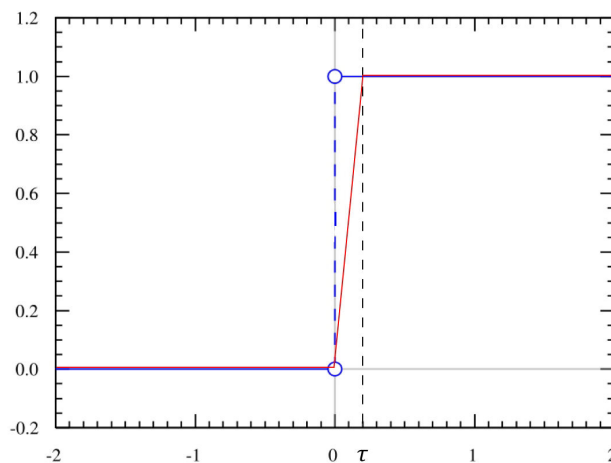


FIGURE 2.18 – Représentation graphique de la fonction discontinue de Heaviside $H(t)$ en bleue. La courbe rouge représente ce que nous observons expérimentalement, soit le temps τ nécessaire au déplacement de l'hydrophone dans l'eau.

a. Signal d'entrée théorique

En considérant une variation de la profondeur de l'hydrophone en un temps τ proche d'une seconde (cas SLIT²), nous pouvons calculer le spectre du signal impulsionnel théorique d'entrée comme suit (annexe B) :

$$F(\omega) = \int_0^{\tau} \frac{t}{\tau} e^{i\omega t} dt + \int_{\tau}^{\infty} e^{i\omega t} dt = \frac{e^{i\omega\tau} - 1}{\omega^2 \tau} \quad (2.31)$$

b. Signal de sortie

Afin d'étudier la réponse instrumentale de notre hydrophone, nous modélisons son enregistrement. Dans le cas de l'élément piézoélectrique d'un hydrophone, nous approximations sa réponse à une fonction de Heaviside au comportement électrique de décharge d'un condensateur en relaxation simple, de la forme : $h(t) = A e^{-\alpha t}$, avec A un facteur d'amplification, α un facteur de la relaxation exponentielle du signal et un temps τ , qui caractérise le temps de descente de l'hydrophone dans l'eau.

La réponse du système $g(t)$ en fonction de A et α , est alors calculée en utilisant l'intégrale du produit de la dérivée de la fonction de Heaviside $f(t)$, qui est une impulsion, et la réponse à la fonction de Heaviside (Scherbaum, 2001) de notre système, soit :

$$g(t) = \int_{-\infty}^t \frac{df(x)}{dx} A e^{-\alpha(t-x)} dx \quad (2.32)$$

En considérant le temps de montée τ dans notre expérience, trois cas de figures sont considérés :

- Pour $x < 0$

$$\frac{df(x)}{dx} = 0 \quad (2.33)$$

- Pour $0 < x < \tau$

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{1}{\tau} \quad (2.34)$$

- Pour $x > \tau$

$$\frac{df(x)}{dx} = 0 \quad (2.35)$$

En considérant que $f(-\infty) = 0$, on a (annexe B) :

- Pour $0 < t < \tau$

$$g(t) = \int_0^t \frac{df(x)}{dx} A e^{-\alpha(t-x)} dx = \left[\frac{A}{\alpha \tau} e^{-\alpha \tau} e^{\alpha x} \right]_0^t = \frac{A}{\alpha \tau} e^{-\alpha \tau} (e^{-\alpha t} - 1) \quad (2.36)$$

- Pour $t > \tau$

$$g(t) = \int_0^\tau \frac{df(x)}{dx} A e^{-\alpha(t-x)} dx = \left[\frac{A}{\alpha \tau} e^{-\alpha \tau} e^{\alpha x} \right]_0^\tau = \frac{A}{\alpha \tau} (1 - e^{-\alpha \tau}) \quad (2.37)$$

c. Modélisation du signal de sortie

Les équations 2.36 et 2.37 sont utilisées afin de modéliser la réponse de l'hydrophone sur les deux intervalles de temps que nous considérons (équations 2.34, 2.35). Afin de réduire le bruit expérimental et environnemental, l'optimisation des paramètres A , α et τ est réalisée après filtrage, en utilisant la fonction MATLAB *lsqcurvefit*, permettant de résoudre des problèmes non-linéaires par la méthode des moindres carrés, de façon à minimiser :

$$J(A, \alpha, \tau) = \sum_{j=1}^N [g_{obs}(t_j) - g_{opt}(t_j)]^2 \quad (2.38)$$

Avec N représentant la longueur du signal utilisé pour l'optimisation. Dans notre étude, nous avons considéré une longueur de six secondes, g_{obs} et g_{opt} représentant respectivement les données observées filtrées et optimisées. Afin de diminuer les erreurs statistiques, nous avons répété nos expériences 39 fois.

L'optimisation des signaux $g(t)$ est réalisée suivant trois étapes :

- Dans un premier temps, les données sont filtrées avec un filtre passe-bas à 10 Hz de type «Butterworth», d'ordre 2, comme illustré en figure 2.19.a. Les courbes noire et rouge représentent respectivement les données brutes et filtrées d'une expérience.
- Dans un deuxième temps, les données sont recalées en abscisse et en ordonnée. En abscisse, le début du signal est initialisé sur la descente de l'hydrophone dans l'eau. La différentielle du signal permet d'établir un seuil de détection, utilisé pour définir le temps t_0 du début du signal. En ordonnée, le signal est recalé à l'aide de sa valeur à $t = 6$ s, où l'on considère que le signal a retrouvé un état d'équilibre et moyenné sur les 400 derniers échantillons. On obtient ainsi le signal illustré sur les graphiques 2.19.b et 2.19.c.
- La dernière étape correspond à l'optimisation avec la fonction *lsqcurvefit* (figure 2.19.d). Le principe mécanique développé entraîne des rebonds de l'hydrophone au début et à la fin

de sa descente dans l'eau (figure 2.19.c). Comme l'oscillation à la fin de la descente n'est pas caractéristique de la réponse de l'hydrophone mais du principe mécanique, nous l'avons exclue de l'optimisation en définissant des valeurs de temps t_1 et t_2 , entre lesquelles le signal n'est pas pris en compte. Le résultat final de l'optimisation est illustré en figure 2.19.d et montre une très bonne correspondance entre les données observées et modélisées. Les courbes noire et rouge représentent respectivement les données de l'hydrophone filtrées et optimisées.

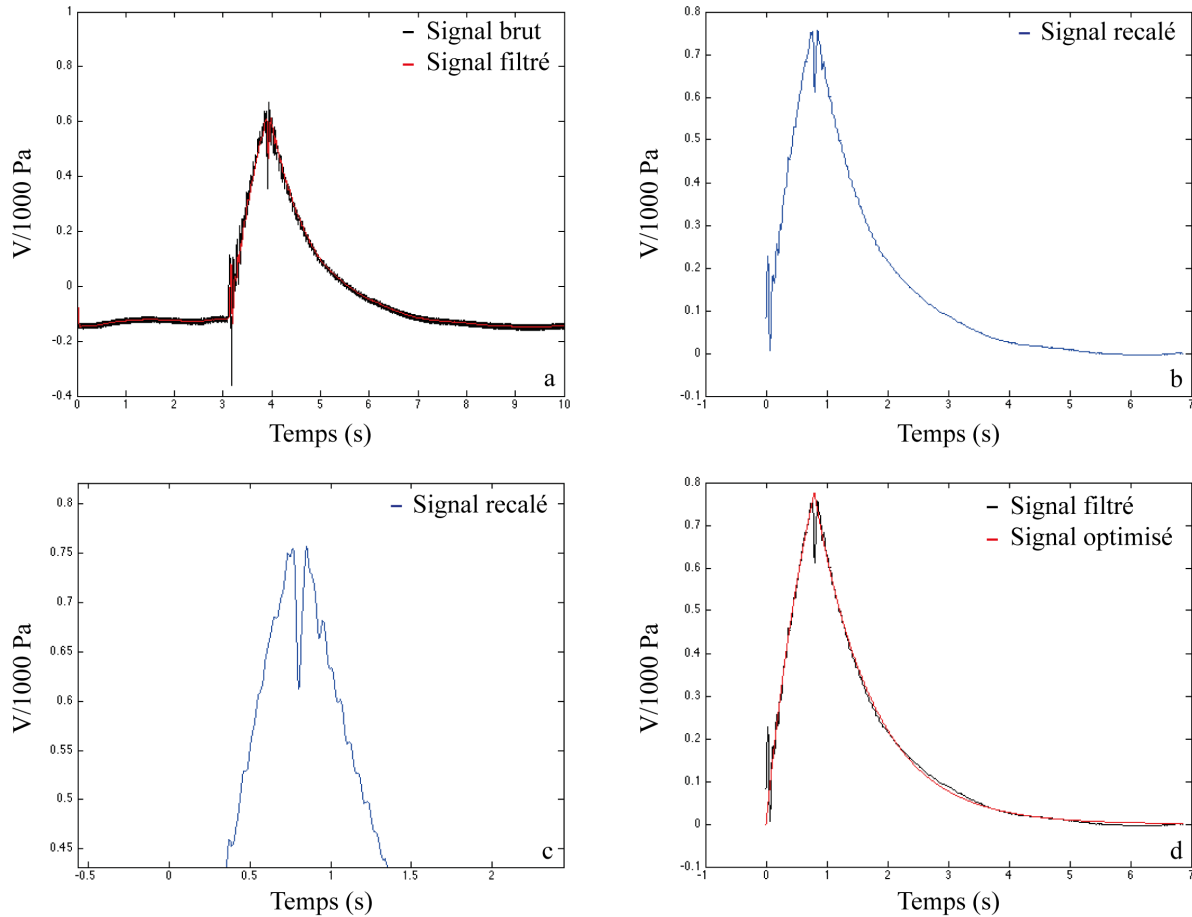


FIGURE 2.19 – Etapes de l'optimisation du signal de sortie de l'hydrophone Rafos I. Le graphique (a) présente respectivement les données brutes et filtrées (filtre passe-bas à 10 Hz de type «Butterworth» et d'ordre 2) en noir et rouge. Le graphique (b) présente les données filtrées après recalage à l'origine. Le graphique (c) correspond à un zoom de la courbe précédente à la fin de la descente de l'hydrophone dans l'eau. Le graphique (d) représente en noir le signal filtré et en rouge le résultat de l'optimisation de ce signal.

Dans cette expérience représentative de la population de mesures, les paramètres de l'optimisation obtenus sont $A = 1,14 \text{ V}/1000 \text{ Pa}$, $\alpha = 1,04 \text{ s}^{-1}$ et $\tau = 0,80 \text{ s}$. Enfin une moyenne de différence relative entre les signaux filtrés et optimisés est calculée suivant l'équation 2.39. Dans l'exemple exposé ici, cette moyenne est de 3,80 %.

$$\overline{g_{obs} - g_{opt}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (g_i^{obs} - g_i^{opt})^2}{\sum_{i=1}^N |g_i^{obs} \times g_i^{opt}|}} \times 100 \quad (2.39)$$

3. Résultats

Afin de rendre cette méthode de calibration fiable et stable, plus de 700 expériences ont été réalisées. Nous proposons d'étudier un jeu représentatif de 39 expériences. La reproductibilité des signaux a été testée en réalisant des expériences du 12 au 19 juin 2012, à divers moments de la journée entraînant des températures légèrement différentes. La répartition des valeurs des paramètres (A , α et τ) caractérisant la réponse instrumentale de l'hydrophone Rafos I sont illustrées sur les histogrammes de la figure 2.20.

L'histogramme du paramètre A montre une répartition des expériences relativement proche d'une loi normale avec $A = 1,10 \pm 0,06$ V/1000 Pa avec des valeurs évoluant entre 0,99 et 1,26 V/1000 Pa. Les valeurs de α montrent également une répartition proche d'une répartition normale avec $\tau = 1,04 \pm 0,11$ s⁻¹, évoluant de 0,75 à 1,23 s⁻¹. La répartition de τ nous permet d'évaluer la qualité de notre expérimentation en mettant en évidence le temps de descente de l'hydrophone dans l'eau. La répartition des valeurs illustre une bonne reproductibilité des expériences. En effet, τ est caractérisé en moyenne par $\tau = 0,79 \pm 0,03$ s, avec un faible écart-type.

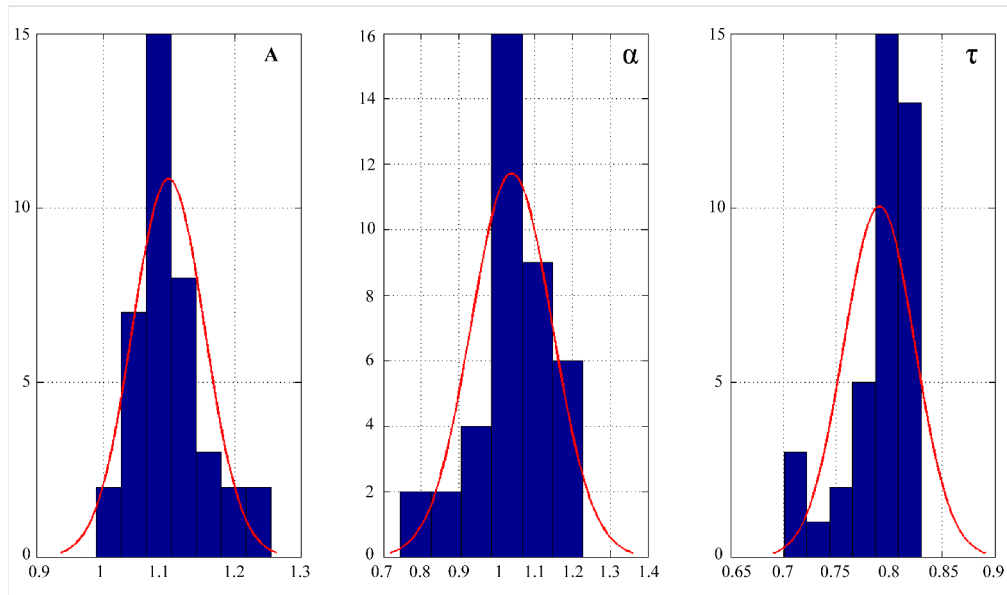


FIGURE 2.20 – Histogrammes des paramètres A (V/1000 Pa), α (s⁻¹) et τ (s) caractérisant la réponse instrumentale de l'hydrophone Rafos I pour un jeu de 39 expériences.

Afin d'étudier la qualité de l'optimisation réalisée, un pourcentage moyen des différences entre les signaux filtrés et optimisés est calculé suivant l'équation 2.39. En étudiant les signaux sur un intervalle de temps de quatre secondes et en excluant les rebonds mécaniques présents à la fin de la descente de l'hydrophone dans l'eau, nous obtenons un pourcentage moyen de différences de 4,40 %, ce qui valide notre méthode.

4. Conclusions

Dans cette partie, nous avons présenté une méthode de calibration dynamique d'hydrophone à basses fréquences, initiée lors d'un stage de Master et finalisée au cours de cette thèse. La non répétabilité des signaux, source de nombreuses difficultés, a été éradiquée grâce aux adaptations réalisées. Afin de garantir le bon fonctionnement de cette méthode, il est impératif de travailler dans un environnement calme et de suivre précautionneusement le protocole exposé dans le tableau 2.3.

Malgré les améliorations réalisées, les signaux présentent des oscillations dues au principe mécanique utilisé. Les contacts avec les butées de début et fin de course entraînent ces oscillations (figure 2.17). Malgré le changement des moteurs et du type de butées, les oscillations sont toujours présentes, bien que diminuées. Le nouveau moteur utilisé permet de varier la vitesse de rotation des roues, afin de limiter l'impact avec les butées. Néanmoins, pour satisfaire la condition d'un temps bref, la rotation ne peut être plus lente. Une descente à 0,79 s s'est avérée être le meilleur compromis entre une valeur $\tau < 1$ s et une amplitude d'oscillation relativement restreinte.

Les oscillations pendant la descente de l'hydrophone dans l'eau ont également été significativement réduites (figure 2.17). Elles résultent d'un mouvement rotatif restreint de l'hydrophone lors de sa descente dans l'eau. Ces oscillations sont dues au câble d'alimentation de l'hydrophone qui laisse une liberté de mouvement à l'hydrophone. Une amélioration du principe serait de fixer l'hydrophone sur un axe rigide, comme dans la méthode de calibration par déplacement vertical (Levin, 1973, section I.3.d).

La finalité de ce développement est de disposer d'une méthode simple, fiable, rapide de mise en œuvre et de faible coup financier. Cette méthode permet d'étudier la réponse instrumentale d'un hydrophone, que nous avons appliquée ici à l'exemple du Rafos I.

Parallèlement au développement de cette méthode dynamique, la carte électronique d'acquisition des flotteurs MERMAID a été finalisée et le modèle d'hydrophone changé, au profit d'un modèle de meilleure sensibilité et de même gabarit, le Rafos II (tableau 2.2). Ces deux paramètres, ainsi

que notre volonté de réduire significativement les oscillations présentes sur les signaux, nous ont convaincus de faire évoluer cette méthode vers une calibration «statique», permettant ainsi de proposer une étude complète de la chaîne d'acquisition des flotteurs MERMAID : l'hydrophone associé à la carte électronique.

III. Développement d'une méthode statique de calibration d'hydrophone à basses fréquences

Nous proposons ici, le développement d'une nouvelle méthode de calibration d'hydrophone à basses fréquences, appliquée à l'hydrophone Rafos II (tableau 2.2, figures 2.12 et 2.13). Cette méthode fait suite à la méthode dynamique précédemment illustrée, reprenant le même principe mathématique mais utilisant un protocole mécanique revisité, au profit d'une méthode statique, permettant de s'affranchir des oscillations perturbant les signaux de la précédente méthode.

Cette méthode propose une étude de la chaîne complète d'acquisition du flotteur MERMAID : l'hydrophone Rafos II associé à la carte électronique. Nous présenterons ainsi le nouveau protocole expérimental et un nouveau programme basé sur la détermination des pôles et zéros du système d'étude. L'article qui présente les travaux développés ci-dessous, publié dans la revue «*Bulletin of Seismological Society of America*», est disponible en annexe C.

Dans la suite du texte, nous avons volontairement conservé des valeurs en counts, en sortie du convertisseur.

1. Protocole expérimental

Afin d'étudier la réponse de l'hydrophone Rafos II, ce dernier est placé dans une chambre de calibration remplie d'eau. Une colonne d'eau additionnelle est ajoutée à la chambre entraînant une brève surpression d'environ 1000 Pa (figure 2.21) suivant le principe développé en partie II de ce chapitre. La méthode développée est appliquée au Rafos II, de meilleure sensibilité que le Rafos I (figure 2.13 et tableau 2.2) et actuellement utilisé sur les flotteurs MERMAID.

L'hydrophone à calibrer est vissé sur la partie supérieure de la chambre de calibration (figure 2.21). L'étanchéité entre l'hydrophone et la partie supérieure de la chambre est assurée à l'aide d'un joint circulaire. La chambre de calibration est remplie d'eau, en mettant un soin particulier à retirer toutes éventuelles bulles d'air. L'étanchéité entre la partie inférieure et supérieure de la chambre de calibration est assurée à l'aide d'un joint circulaire et de trois vis disposées à 120° les unes des autres.

Une électrovane (type Norgren V03) est montée sur la partie supérieure de la chambre de calibration. Lorsque celle-ci est activée, l'eau contenue dans le caisson et l'eau de la colonne additionnelle entrent en contact, générant une surpression d'environ 1000 Pa (partie II.2).

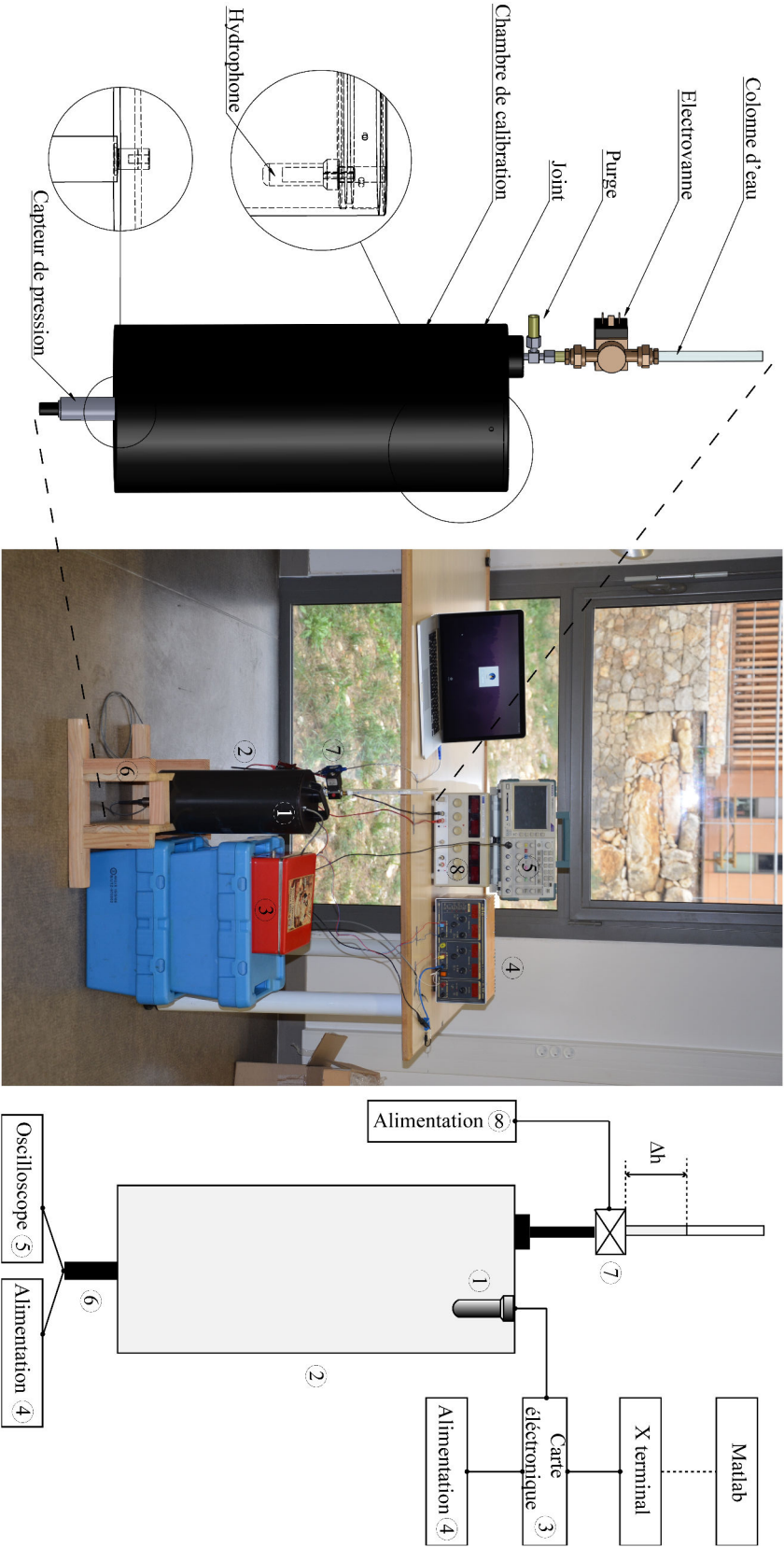


FIGURE 2.21 – Protocole expérimental de la méthode de calibration «statique» d’hydrophone à basses fréquences.

Afin de vérifier l'établissement de l'augmentation de la pression, en termes d'amplitude et de temps, un second capteur de pression (type OEM, CTE8000) est vissé sur la partie inférieure de la chambre de calibration. Ce capteur permet de mesurer la pression différentielle dans le caisson après ajout de la colonne d'eau additionnelle. Ce capteur utilise un élément piézoélectrique comme partie sensible, il s'utilise sur ± 1 bar (plage de ± 5 V). Un exemple d'enregistrement du capteur de pression est illustré en figure 2.22.

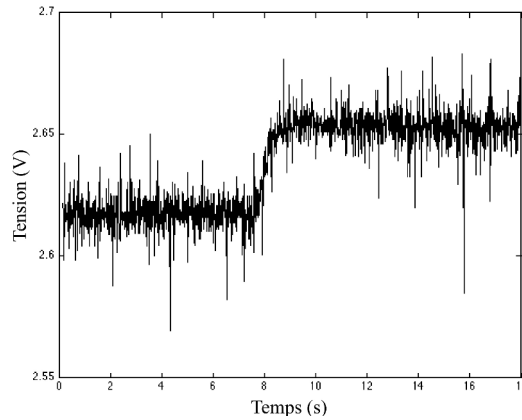


FIGURE 2.22 – Exemple d'un enregistrement du second capteur de pression, placé sous la chambre de calibration (figure 2.21).

Entre chaque expérience, il est nécessaire de purger le système et de réajuster précisément la hauteur d'eau Δh de 0,1 m afin d'obtenir la surpression souhaitée.

L'hydrophone est connecté à la carte électronique (figures 2.21 et 2.23 à droite) grâce à un câble coaxial. Les fréquences sont restreintes de 0,1 à 10 Hz à l'aide d'un filtre passe-bande intégré dans la carte électronique. La fréquence d'échantillonnage est de 40 Hz, comme celle utilisée sur les flotteurs MERMAID.

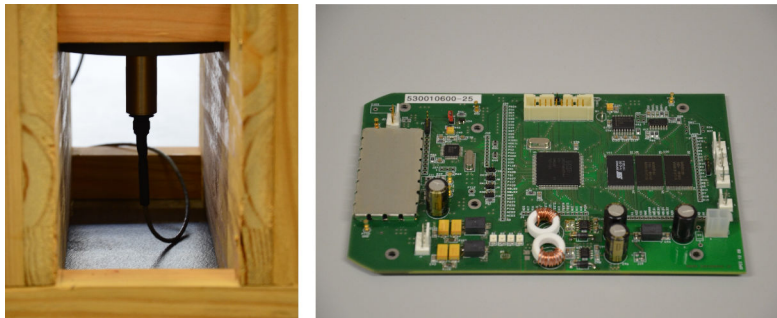


FIGURE 2.23 – A gauche est représenté le second capteur de pression (type OEM-CTE8000) et à droite la carte électronique du flotteur MERMAID.

La répétabilité des signaux a également été source de nombreuses difficultés. Le protocole strict de mesure mis en place lors du développement de la méthode dynamique (tableau 2.3) a été repris et adapté (tableau 2.4) afin de pallier à la non répétabilité des signaux. L'ajustement de la colonne d'eau entre $2 \text{ min} < t < 3 \text{ min}$, doit être réalisé précisément afin de produire une augmentation de pression cohérente. Entre deux jours d'acquisitions, il est nécessaire de changer l'eau du caisson, afin d'éviter la formation de bulles d'air dans le caisson. Le cas échéant, les bulles pourraient amortir la surpression créée.

Temps	Action
$t = 0 \text{ min}$	Lancement de l'acquisition
$t = 1 \text{ min}$	Activation de l'électrovanne / Contact des fluides
$t = 2 \text{ min}$	Arrêt de l'acquisition
$t \leq 3 \text{ min}$	Purge et réinitialisation de la hauteur de la colonne d'eau
$t = 6 \text{ min}$	Fin de stabilisation de l'élément piézoélectrique et du filtre passe-haut Début d'un nouveau cycle

TABLEAU 2.4 – Protocole de mesures de la méthode de calibration statique.

2. Principe mathématique

Dans une première approche, nous avons utilisé l'outil d'optimisation du signal de sortie développé avec la méthode de calibration dynamique (partie II.2). L'effet des filtres, notamment filtre de Tchebychev (ordre 4, passe-bas à 12 Hz) de la carte électronique, a cependant modifié l'allure du signal enregistré par l'hydrophone en réponse à la fonction de Heaviside d'entrée. Ce signal n'est plus en amortissement critique mais en amortissement pseudopériodique, sous zéro, nous conduisant à modifier le programme développé. Nous avons tiré profit de cette modification pour développer un nouveau programme basé sur la détermination de la fonction de transfert de l'hydrophone en déterminant les pôles et zéros de notre système.

a. Fonction de transfert d'un système

Wielandt, 2012 expose les moyens d'étudier la réponse d'un sismomètre grâce à l'étude de :

- L'équation différentielle linéaire,
- La fonction de transfert de Laplace,
- La réponse complexe fréquentielle,
- La réponse impulsionnelle du système.

Les deux premières méthodes sont déterminées par analyse mathématique et physique, alors que les deux dernières sont liées à des procédures de calibration du système.

Dans le deuxième cas, la transformée de Laplace permet de définir la fonction de transfert d'un système, elle se définit par les équations 2.40 et 2.41, respectivement pour les transformées directe et inverse :

$$F(s) = L \{f(t)\} = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \quad (2.40)$$

$$f(t) = L^{-1} \{F(s)\} = \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} F(s) e^{st} ds \quad (2.41)$$

Les transformées de Laplace permettent de décomposer des signaux (pour $t = 0$ ou $t > 0$) en fonctions exponentielle ou sinusoïdale. Avec s une variable complexe et σ un paramètre définissant la tendance de $f(t)$ en décroissance $\sigma < 0$, stationnaire $\sigma = 0$ ou en croissance $\sigma > 0$.

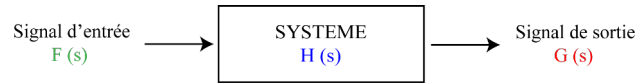


FIGURE 2.24 – Schéma du système d'étude pour la détermination des pôles et zéros.

En s'intéressant à l'étude du système $H(s)$ soumis à un signal d'entrée $F(s)$ et résultant $G(s)$ (figure 2.24), nous pouvons écrire l'équation différentielle de ce système en fonction des transformées de Laplace :

$$\begin{aligned} f(t) &\Leftrightarrow F(s) & \text{et} & & g(t) &\Leftrightarrow G(s) \\ f'(t) &\Leftrightarrow s F(s) & \text{et} & & g'(t) &\Leftrightarrow s G(s) \\ f''(t) &\Leftrightarrow s^2 F(s) & \text{et} & & g''(t) &\Leftrightarrow s^2 G(s) \\ & & & & \dots & \end{aligned} \quad (2.42)$$

Par exemple, si l'équation différentielle du système s'écrit suivant l'équation 2.43, alors on peut la réécrire suivant l'équation 2.44 :

$$c_2 f''(t) + c_1 f'(t) + c_0 f(t) = d_2 g''(t) + d_1 g'(t) + d_0 g(t) \quad (2.43)$$

$$c_2 s^2 F(s) + c_1 s F(s) + c_0 F(s) = d_2 s^2 G(s) + d_1 s G(s) + d_0 G(s) \quad (2.44)$$

En exprimant le signal de sortie en fonction du signal d'entrée, on obtient :

$$G(s) = \frac{c_2 s^2 + c_1 s + c_0}{d_2 s^2 + d_1 s + d_0} F(s) \quad (2.45)$$

De cette façon, l'équation différentielle du système est exprimée en termes des transformées de Laplace des signaux d'entrée et de sortie.

La fonction rationnelle $H(s)$ (équation 2.46) permet de définir la fonction de transfert du système, que l'on peut généraliser par l'équation 2.47 :

$$H(s) = \frac{c_2 s^2 + c_1 s + c_0}{d_2 s^2 + d_1 s + d_0} \quad (2.46)$$

$$H(s) = \frac{G(s)}{F(s)} \quad (2.47)$$

Dans le cas d'une impulsion de Dirac (Oppenheim *et al.*, 1983), la transformée de Laplace est égale à 1 ($F(\omega) = 1$) et la fonction de transfert est alors égale à la transformée de Laplace du signal de sortie :

$$H(\omega) = G(\omega) \quad (2.48)$$

En instrumentation, il est couramment admis d'exprimer la fonction de transfert (équations 2.46 et 2.47) en termes des pôles et zéros, suivant l'équation :

$$H(s) = \frac{c_m s^m + c_{m-1} s^{m-1} + \dots + c_0}{d_n s^n + d_{n-1} s^{n-1} + \dots + d_0} \quad (2.49)$$

Et sous forme factorisée :

$$H(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = A \frac{(s - z_1)(s - z_2) \dots (s - z_{m-1})(s - z_m)}{(s - p_1)(s - p_2) \dots (s - p_{n-1})(s - p_n)} \quad (2.50)$$

Avec :

$$A = \frac{c_m}{d_n} \quad (2.51)$$

Les pôles (p_n) représentent les racines du dénominateur ($D(s) = 0$) de la fonction de transfert et les zéros (z_n) celles du numérateur ($N(s) = 0$).

Application de la fonction de transfert à un système

Comme exemple, considérons le système défini par l'équation différentielle suivante :

$$f''(t) + 5 f'(t) + 6 f(t) = 2 g'(t) + 1 \quad (2.52)$$

Les transformées de Laplace sont définies par :

$$\begin{aligned} f''(t) &\Leftrightarrow s^2 F(s) \\ f'(t) &\Leftrightarrow s F(s) \quad \text{et} \quad g'(t) \Leftrightarrow s G(s) \\ f(t) &\Leftrightarrow F(s) \end{aligned} \tag{2.53}$$

Nous pouvons réécrire l'équation 2.52 en :

$$s^2 F(s) + 5 s F(s) + 6 F(s) = 2 s G(s) + 1 \tag{2.54}$$

La fonction de transfert devient alors :

$$\frac{F(s)}{G(s)} = H(s) = \frac{2s + 1}{s^2 + 5s + 6} \tag{2.55}$$

Après factorisation, on obtient :

$$H(s) = \frac{1}{2} \frac{s + \frac{1}{2}}{2(s + 3)(s + 2)} \tag{2.56}$$

Ou :

$$H(s) = \frac{1}{2} \frac{s + \frac{1}{2}}{2(s - (-3))(s - (-2))} \tag{2.57}$$

Nous obtenons un zéro réel à $s = -1/2$ et deux pôles réels $s = -2$ et $s = -3$. Le graphique de pôles et zéros associé est illustré en figure 2.25.

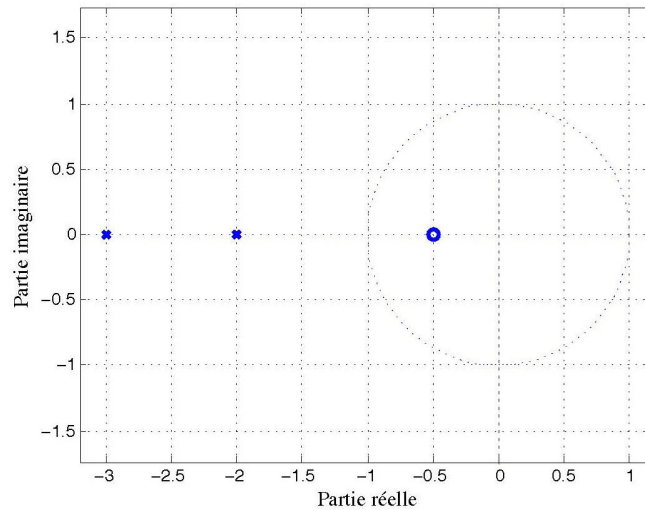


FIGURE 2.25 – Graphique des pôles (croix) et zéros (cercles) du système pris en exemple.

Dans le cadre du développement de cette deuxième méthode, nous nous sommes intéressés à la détermination des pôles et zéros de notre système, l'hydrophone Rafos II associé à la carte électro-

nique.

b. Détermination des pôles et zéros du système d'étude

Wielandt, 2012 et Ringler *et al.*, 2012 ont décrit des méthodes d'estimation des pôles et zéros d'un instrument à partir de la réponse impulsionnelle du système. Comme nous n'avons pas trouvé de méthode simple de détermination des pôles et zéros à partir d'une fonction de Heaviside, nous avons développé une méthode alternative que nous appliquons à l'hydrophone Rafos II en association à la carte électronique d'acquisition.

Dans la suite de cette partie, nous utilisons la convention de Fourier suivante :

$$H(\omega) = \int_0^{\infty} h(t) e^{i\omega t} dt \quad (2.58)$$

La fonction de transfert de notre système ou réponse impulsionnelle $H(\omega)$ (figure 2.26) est approximée par un nombre de pôles n_p et un nombre de zéros n_z , suivant l'équation 2.59 (reprenant l'équation 2.50) :

$$H(\omega) = A_0 \frac{(i\omega - z_1)(i\omega - z_2) \dots (i\omega - z_{n_z})}{(i\omega - p_1)(i\omega - p_2) \dots (i\omega - p_{n_p})} \quad (2.59)$$

Dans cette méthode, nous appliquons une transformée de Fourier inverse du spectre $H(\omega)$ afin de prédire la réponse du système dans le domaine temporel $g(t)$. Les résidus entre la courbe des données observées et optimisées sont minimisés en suivant la méthode des moindres carrés (équation 2.38).

Le temps nécessaire à l'établissement de la surpression (t_τ) dans la chambre de calibration a été pris en compte dans le signal d'entrée en utilisant un second capteur de pression placé à la base de celle-ci (figures 2.21, 2.22, 2.23). Le signal correspond alors à un signal de type rampe (figure 2.26).

Pour une fonction d'entrée de Heaviside pure d'amplitude P_0 , le spectre est défini par :

$$F(\omega) = \frac{-P_0}{i\omega} \quad (2.60)$$

En considérant désormais l'influence du temps t_τ , le spectre du signal d'entrée devient :

$$R(\omega) = P_0 \frac{e^{i\omega t_\tau} - 1}{\omega^2 t_\tau} \quad (2.61)$$

La détermination des pôles et zéros d'un système est un procédé non linéaire complexe. Afin de faire converger notre optimisation vers une solution, il est nécessaire d'avoir une bonne estimation de

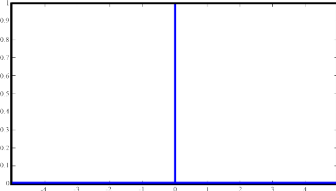
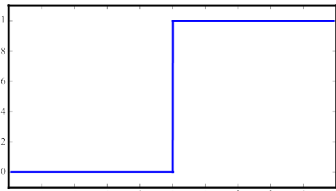
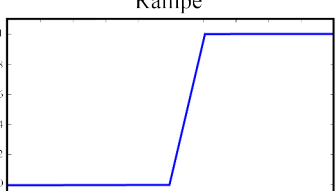
Fonction \ Domaine	Temporel	Fréquentiel		
Signal		Entrée	Sortie	Fonction de transfert
<p style="text-align: center;">Impulsion de Dirac</p> 	$I(x) = \begin{cases} 0 & x \neq 0 \\ +\infty & x = 0 \end{cases}$	$I(\omega) = 1$	$G^P(\omega)$	$H(\omega) = G^P(\omega)$
<p style="text-align: center;">Heaviside</p> 	$S(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 1 & x \geq 0 \end{cases}$	$S(\omega) = \frac{-P_0}{i\omega}$	$G^S(\omega)$	$H(\omega) = -i\omega G^S(\omega)$
<p style="text-align: center;">Rampe</p> 	$R(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ 1/t_r & 0 < x < 1 \\ 1 & x \geq 1 \end{cases}$	$R(\omega) = P_0 \frac{e^{i\omega t_r} - 1}{\omega^2 t_r}$	$G^{L_r}(\omega)$	$H(\omega) = \frac{G^{L_r}(\omega)}{R(\omega)}$

FIGURE 2.26 – Tableau récapitulant les fonctions de Dirac, de Heaviside et rampe dans les domaines temporel et fréquentiel.

départ des pôles et zéros ainsi que de leurs nombres. Pour cela, nous distinguons deux cas potentiels en fonction de la tendance de la réponse du système :

Le cas **critique** obtenu lors du développement de la méthode de calibration dynamique à basses fréquences (partie II de ce chapitre). Ces signaux sont définis par un amortissement sur l'axe de $f(x) = 0$, comme illustré par la courbe en larges pointillés en figure 2.27.

Le cas **pseudopériodique**, correspondant à un signal amorti au-dessous de zéro (figure 2.27, courbe noire pleine). Expérimentalement, nous avons observé ce type d'amortissement après l'association de la carte d'acquisition et de l'hydrophone Rafos II. Nous pensons que cet amortissement peut-être du à l'un des filtres de la carte, notamment un filtre de Tchebychev.

Afin d'obtenir une première approximation de la réponse en termes de pôles et zéros, nous considérons que les signaux, en réponse à une fonction de Heaviside, peuvent être modélisés suivant les

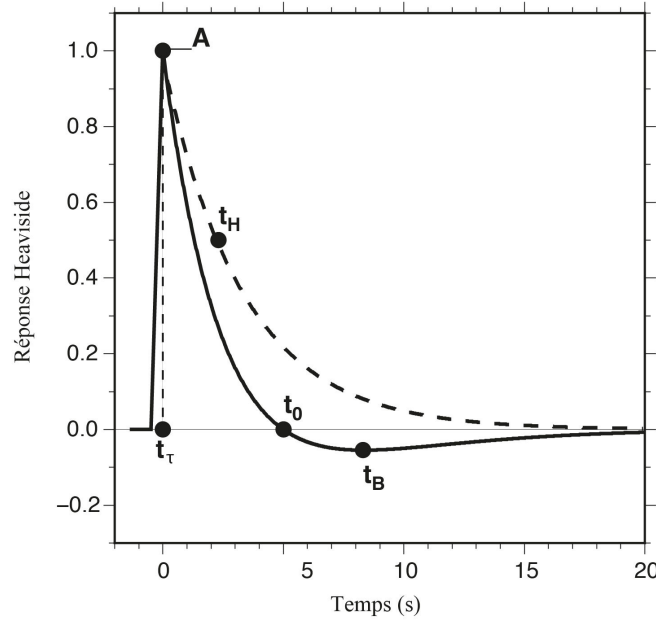


FIGURE 2.27 – Graphique des deux cas d'amortissements de signaux considérés : en larges pointillés le cas critique et en ligne continue le cas pseudopériodique.

équations :

Cas **critique** :

$$g(t) = A e^{-\alpha t} \quad (2.62)$$

Cas **pseudopériodique** :

$$g(t) = (A + B t) e^{-\alpha t} \quad (2.63)$$

Dans le cas pseudopériodique, une bonne estimation de départ à partir d'un jeu d'un zéro et de deux pôles (un premier zéro étant considéré à $(0, 0)$), a été utilisé. Le signal de sortie modélisé suivant l'équation 2.63 en domaine fréquentiel devient alors :

$$H(\omega) = -A \frac{i\omega - \alpha - \frac{B}{A}}{(i\omega - \alpha)^2} \quad (2.64)$$

Nous observons un zéro réel à $i\omega = \alpha + \frac{B}{A}$ et deux pôles réels à α .

Les paramètres de A , B et α peuvent alors être estimés à partir du signal considéré. Ainsi, A représente l'amplitude maximum du signal à $t = t_\tau$, B est estimé à partir du temps t_0 suivant (figure 2.27) :

$$B = -\frac{A}{t_0} \quad (2.65)$$

Le paramètre α est estimé à partir du temps de l'amplitude minimale du signal :

$$\alpha = \frac{B}{A + B t_B} \quad (2.66)$$

Où, t_B est défini par $g'(t_B) = 0$.

Les deux pôles et le zéro définis par ces estimations de A , B et α sont alors utilisés comme valeurs initiales pour l'optimisation.

On prend également en compte le temps t_r par lecture du capteur de pression placé sous la chambre de calibration (figures 2.21, 2.22 et 2.23).

Dans le cas critique, nous considérons une relaxation du signal en décroissance exponentielle simple avec $B = 0$. Nous maintenons le jeu initial de deux pôles et d'un zéro. Lors de la première itération du programme, il est possible pour l'utilisateur de changer ces valeurs. Dans ce cas, on estime la valeur de α à partir du temps de demi-relaxation du signal t_H , le temps pour lequel l'amplitude du signal a été divisée par deux :

$$\alpha = \frac{\ln(0,5)}{t_H} = \frac{0,693}{t_H} \quad (2.67)$$

3. Modélisation des pôles et zéros par le programme «polezero»

Le programme développé est disponible en téléchargement libre sur le site : <https://geoazur.fr/GLOBALSEIS/Soft.html>, il est programmé en langage Fortran 90 et utilise GMT (Wessel et Smith, 1991) pour l'affichage des résultats.

Le programme considère les deux cas de signaux potentiels en fonction de leurs amortissements, critique ou pseudopériodique (figure 2.27) et suit l'organigramme exposé en figure 2.28.

Les courbes obtenues dans le cas pseudopériodique de notre application sont illustrées en figure 2.29 et la distribution des pôles et zéros associés en figure 2.30. Une explication détaillée est disponible en annexe D.

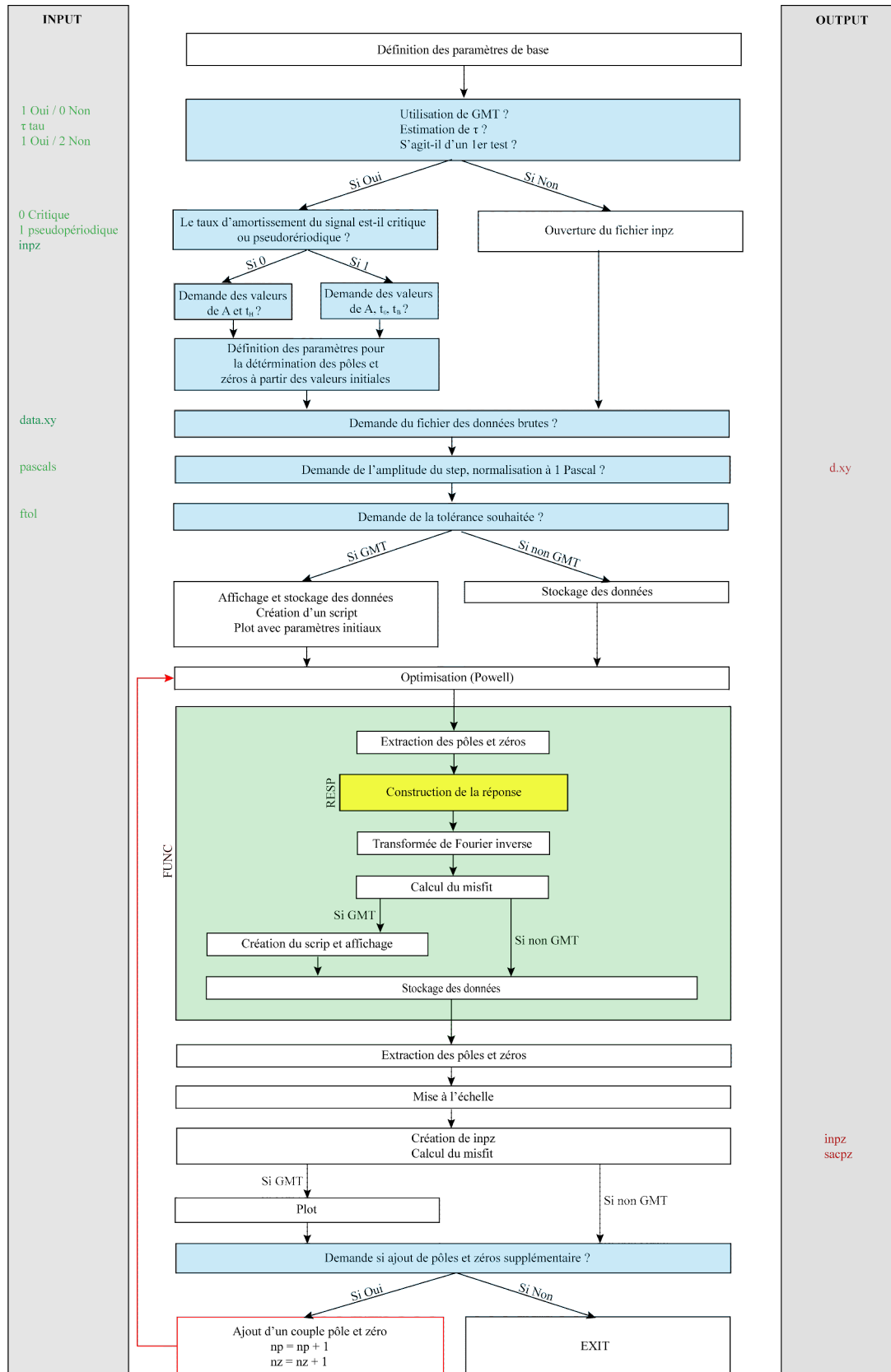


FIGURE 2.28 – Organigramme du programme «polezero» de la détermination des pôles et zéros d'un système.

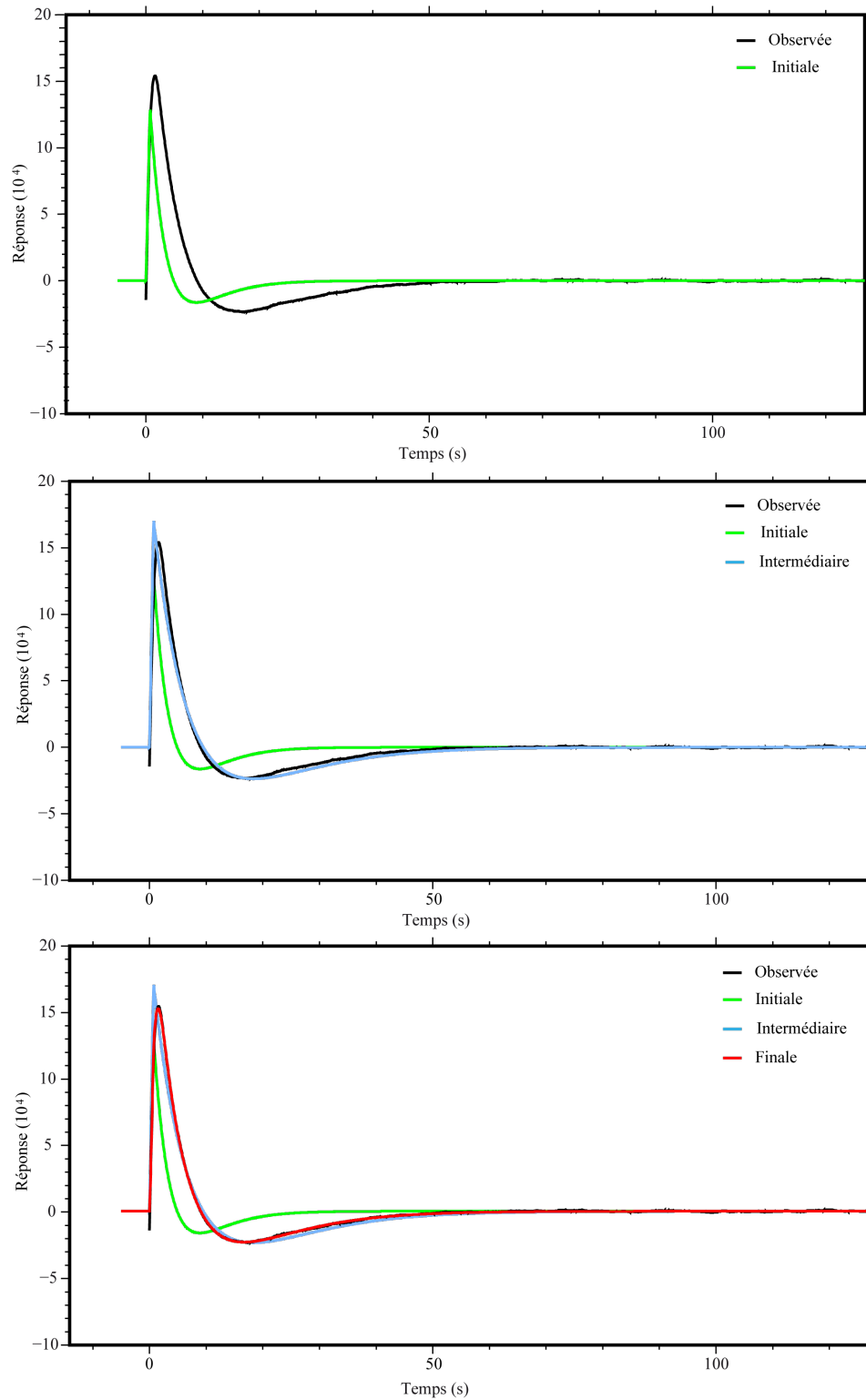


FIGURE 2.29 – Résultats du programme «polezero». Sur le graphique (a), la courbe verte représente le point de départ de la recherche des pôles et zéros à partir d'un jeu initial d'un zéro et de deux pôles. La courbe noire représente les données observées par l'utilisateur. Le graphique (b) reprend les courbes précédentes en y ajoutant en bleu le résultat de l'optimisation. Le graphique (c) reprend les courbes précédentes et ajoute la courbe finale en rouge obtenue pour quatre pôles et trois zéros.

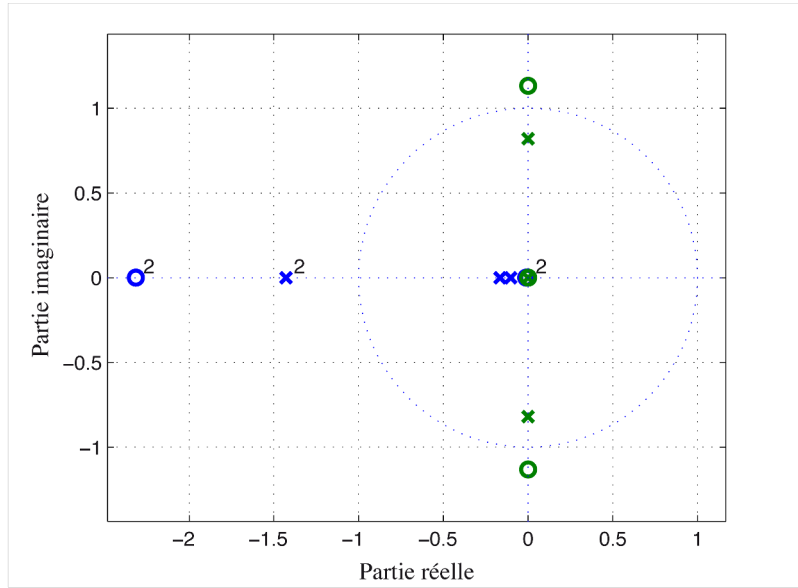


FIGURE 2.30 – Graphique des pôles (croix) et zéros (cercles) du système d'étude.

4. Résultats

Afin de caractériser la réponse instrumentale d'un hydrophone, nous avons étudié un jeu de 21 expériences représentatives réalisées le 16 mai 2014, à divers moments de la journée, entraînant des conditions de températures différentes. La moyenne de l'amplitude maximum mesurée sur les signaux ($1,54 \pm 0,13 \times 10^8$ counts) est utilisée comme critère de rejet. Les expériences dont les amplitudes maximales sont supérieures à deux fois l'écart-type sont rejetées, dans le jeu de données considéré cela représente une expérience.

Le résultat du programme de détermination des pôles et zéros de notre système est illustré en figure 2.29.c, sur laquelle nous pouvons observer une très bonne correspondance, après trois itérations, entre les données modélisées et observées, avec un résidu de 0,002.

Nous avons appliqué notre correction à l'exemple concret du séisme de Barcelonnette survenu le 7 avril 2014, de magnitude $M_w = 4,8$ (USGS³). Ce séisme a été enregistré par trois flotteurs MERMAID déployés en mer Méditerranée durant cette période. La figure 2.31 présente les positions et les enregistrements des flotteurs MERMAID lors du séisme. En appliquant la correction des pôles et zéros aux sismogrammes, nous obtenons la figure 2.32 représentant en ordonnées la variation de pression (Pa) enregistrée par les flotteurs.

3. United States Geological Survey

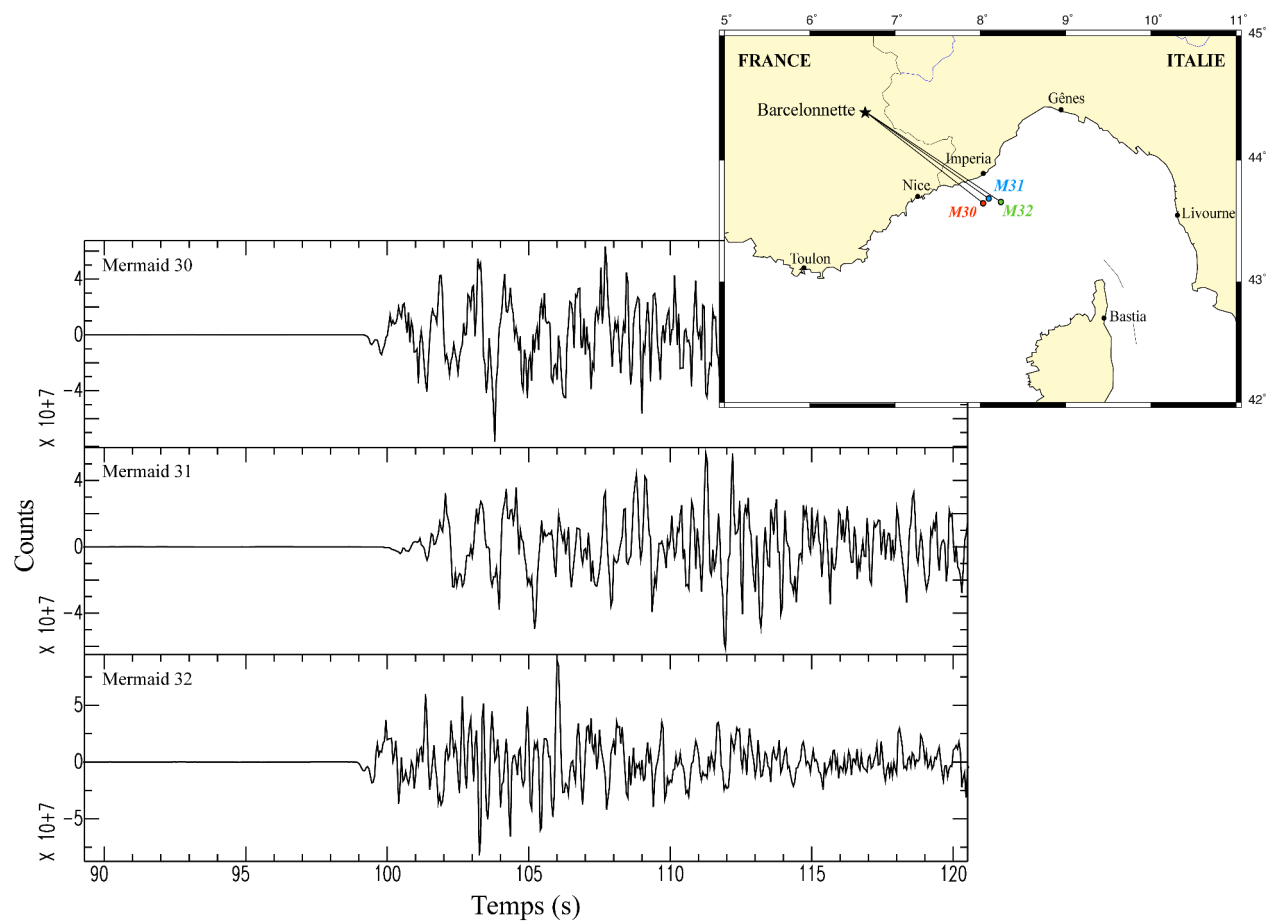


FIGURE 2.31 – Sismogrammes des flotteurs MERMAID lors du séisme de Barcelonnette (07/04/2014, $M_w = 4,8$, USGS).

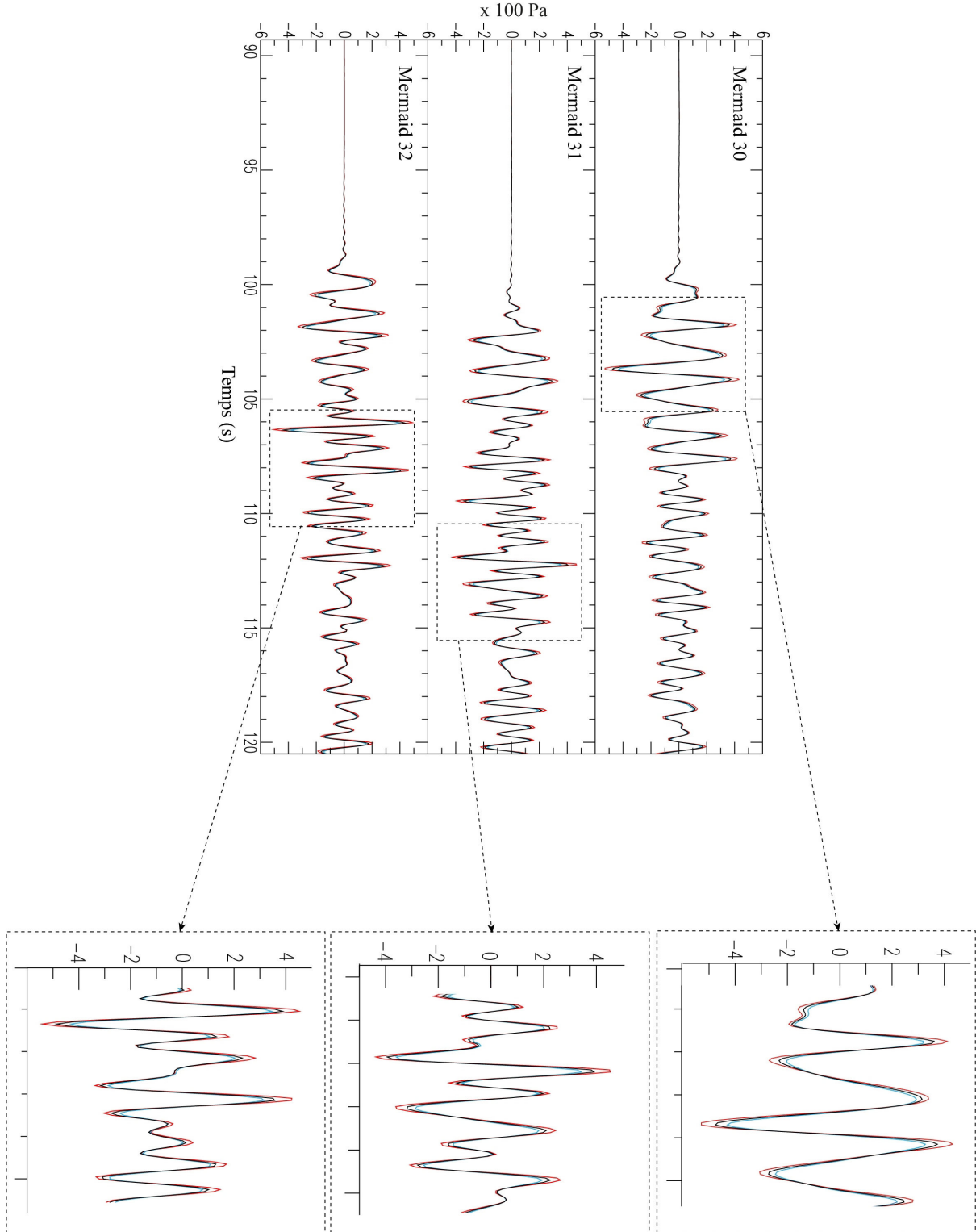


FIGURE 2.32 – Sismogrammes des flotteurs MERMAID avec application de la correction des pôles et zéros. Exemple du séisme de Barcelonnette le 07 avril 2014 ($M_w = 4,8$, USGS). Les courbes rouge, noire et bleue représentent respectivement les valeurs de $t_\tau = 0,65$, $t_\tau = 0,73$ et $t_\tau = 0,80$.

L'enregistrement du capteur de pression étant fortement bruité (figure 2.22), nous avons testé différentes valeurs de t_τ afin de voir l'influence de ce paramètre sur nos résultats. Sur les 21 expériences considérées, t_τ est défini par $t_\tau = 0,73 \pm 0,09$ s. Nous avons donc testé la correction instrumentale des sismogrammes des MERMAID pour $t_\tau = 0,65$ s, $t_\tau = 0,73$ s et $t_\tau = 0,80$ s, respectivement en rouge, noir et bleu sur la figure 2.32. La variabilité entre les trois valeurs de t_τ indique une faible influence de ce paramètre sur l'amplitude des signaux, ce qui permet de minimiser l'impact éventuel d'une mauvaise estimation de la lecture de t_τ par le capteur de pression. Les différences maximales de la pression observées, sur l'exemple de la figure 2.32 dans le cas du flotteur M32, sont de 2,5 % pour $t_\tau = 0,73$ s et $t_\tau = 0,80$ s (24 Pa) et de 20 % pour $t_\tau = 0,73$ s et $t_\tau = 0,65$ s (195 Pa).

La correction instrumentale de notre système, nous permet désormais d'étudier les enregistrements en termes de variation de la pression. Ainsi, le séisme de Barcelonnette a engendré une variation de pression d'une valeur maximale d'environ 500 Pa (figure 2.32).

5. Conclusions et discussion

Dans cette partie, nous avons proposé une nouvelle méthode de calibration d'hydrophone à basses fréquences basée sur la détermination des pôles et zéros d'un système et appliqué nos résultats à l'étude des sismogrammes de trois flotteurs MERMAID, dans le cadre du séisme local de Barcelonnette (07/04/2014, $M_w = 4,8$).

Nous avons appliqué cette méthode à l'hydrophone Rafos II, utilisé sur le flotteur MERMAID dans le cadre du projet GLOBALSEIS. L'intégralité des flotteurs ayant été déployée dans différentes mers et océans du globe, nous avons développé cette méthode parallèlement à leurs déploiements. Dans un futur proche, il sera possible de calibrer chaque couple hydrophone-carte d'acquisition des flotteurs afin d'obtenir une réponse instrumentale individuelle. Cela permettra de pallier aux éventuelles variabilités inter-éléments et inter-composants électroniques.

Cette nouvelle méthode présente la particularité de pouvoir caractériser l'ensemble de la chaîne d'acquisition, l'hydrophone et la carte électronique et ne nécessite pas l'utilisation d'un hydrophone étalon. Elle permet également de corriger la réponse instrumentale en utilisant un faible nombre de pôles et zéros. Dans l'exemple utilisé, une excellente correspondance a été obtenue entre les données observées et modélisées avec un jeu de quatre pôles et trois zéros.

L'application de la correction aux enregistrements de trois flotteurs MERMAID, nous a permis de faire un parallèle entre la valeur en counts issue d'un sismogramme et une valeur de pression (Pa).

Lors du séisme de Barcelonnette, suite à l’arrivée de l’onde P , la variation de pression était d’environ 500 Pa.

Conclusions techniques

Afin de rendre cette méthode de calibration fiable et stable, 655 expériences ont été réalisées. Le principe mécanique a notamment subi de nombreuses adaptations pour être performant. Pour garantir une bonne répétabilité des signaux, il est nécessaire de strictement respecter le protocole expérimental développé en partie III.2. Des précautions supplémentaires doivent être prises par rapport à la méthode de calibration dynamique (partie II de ce chapitre). Afin d’éviter la formation de bulles d’air, un soin particulier doit être porté au remplissage du caisson et à la purge de la colonne d’eau. La position de cette dernière pourrait être optimisée, en modifiant la forme du bouchon supérieur du caisson pour une forme de cône de révolution, sur lequel la purge serait située à l’extrémité. De cette façon, les bulles d’air s’accumuleraient à cette extrémité et seraient plus facilement évacuées.

A la vue des nombreux tests réalisés, nous avons conclu qu’il était nécessaire de vidanger le caisson entre deux jours d’expériences, afin d’éviter l’agglomération de plusieurs bulles d’air de petits diamètres. Une seconde amélioration serait d’utiliser des matériaux transparents pour la conception du caisson, afin de vérifier l’absence de bulles dans ce dernier. Le caisson actuel est usiné en polyoxyméthylène noir (polyacétal POM-C), principalement utilisé pour sa propriété de très bonne résistance à la pression.

L’augmentation de pression dans le caisson est établie en un temps $t_\tau < 1\text{ s}$ ($t_\tau = 0,73\text{ s} \pm 0,09\text{ s}$), correspondant à une fonction d’entrée de type rampe et non une fonction de Heaviside. Le temps de réponse de l’électrovanne (type Norgren V03) est compris entre 8 et 15 ms suivant les modèles considérés. La raison du délai important de l’établissement de la surpression dans le caisson n’est à ce jour pas identifiée. Différentes pistes et modèles d’électrovannes ont été testés (types Norgren V03 et V05) sans apporter d’amélioration. Néanmoins, il est nécessaire de prendre en compte le temps t_τ pour le calcul des pôles et zéros.

Application

Intéressons-nous à l’estimation de la valeur de la pression enregistrée par un hydrophone suite à l’arrivée d’une onde P . Nous utilisons l’exemple du télé-séisme du 10 août 2014 en provenance du Japon ($M_w = 6,1$, IRIS⁴). Les enregistrements de deux flotteurs MERMAID déployés en mer Méditerranée sont illustrés en figure 2.33. Après correction, nous obtenons une augmentation maximale

4. Incorporated Research Institutions for Seismology

de pression d'environ 4 Pa, avec ± 1 Pa de bruit.

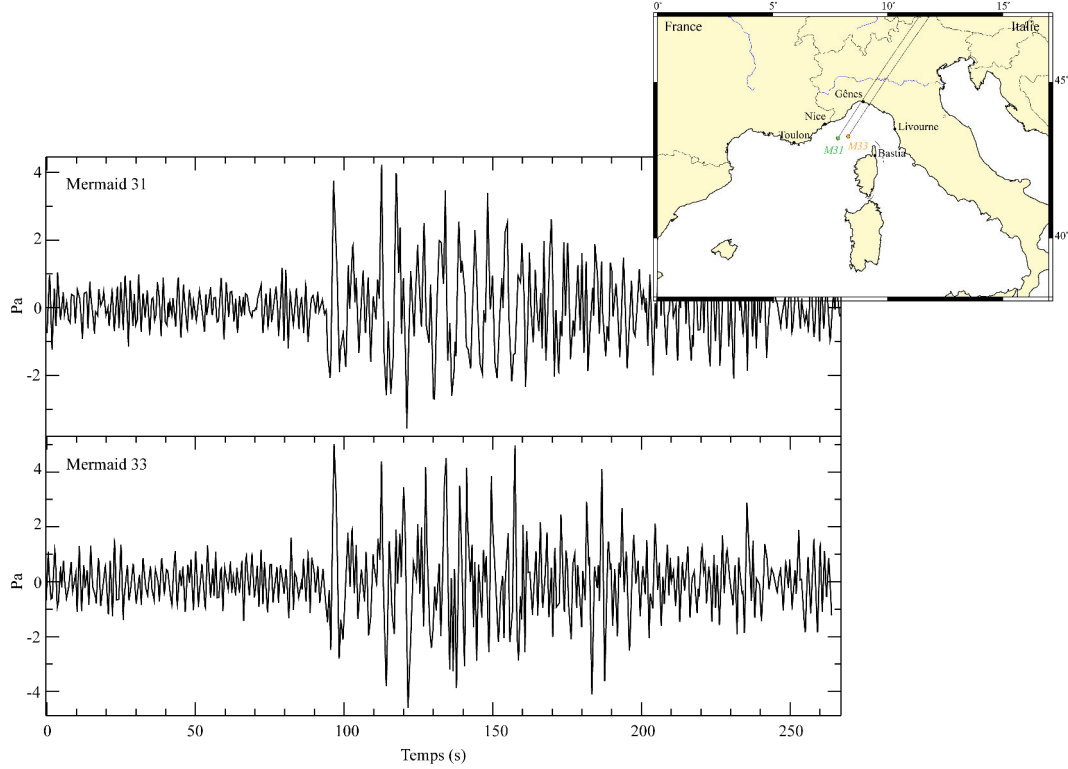


FIGURE 2.33 – Sismogrammes corrigés de deux flotteurs MERMAID lors du séisme du 10 août 2014 ($M_w = 6,1$ IRIS), en provenance d'Hokkaido, Japon.

D'après [Simons et al., 2009](#), une estimation de la variation de pression sonore induite par un séisme et enregistrée par un hydrophone peut être calculée suivant :

$$p = \frac{\rho_w c \omega u_z(\phi)}{\cos(\theta)} \quad (2.68)$$

Avec ρ_w la masse volumique de l'eau en mer Méditerranée ($\rho_w = 1030 \text{ kg/m}^3$), $c = 1430 \text{ m/s}$ la vitesse de propagation de l'onde dans l'eau, ([Simons et al., 2009](#) utilisent une vitesse de propagation d'une onde P proche du sol marin de $c = 5800 \text{ m/s}$), $\omega = 2\pi f$ la fréquence angulaire dont $f = 0,17 \text{ Hz}$ dans le cas du télé-séisme étudié, θ l'angle d'incidence du rai avec la verticale et $u_z(\phi)$ la composante verticale du déplacement du sol suite à l'arrivée de l'onde. On peut calculer le déplacement du sol suivant l'équation 2.69 :

$$u = \frac{10^{m_b - Q(\Delta)}}{f} \quad (2.69)$$

Où $Q(\Delta)$ est le facteur de correction du séisme en fonction de la distance épacentrale (ici $\Delta = 86^\circ$) et de l'hypocentre du séisme (ici 41 km) d'après [Bormann, 2002](#).

En appliquant les équations 2.68 et 2.69 au séisme du Japon (figure 2.33), avec un facteur de correction $Q(\Delta) = 7,0$ (Bormann, 2002), nous obtenons une estimation de la pression générée d'environ 1,2 Pa (équation 2.70 et 2.71).

$$u = \frac{10^{6,1-7,0}}{0,17} = 0,74 \mu m \quad (2.70)$$

$$p = \frac{1030 \times 1430 \times 2\pi 0,17 0,74 \times 10^{-6}}{1} = 1,2 Pa \quad (2.71)$$

Cette observation est de l'ordre de grandeur de l'amplitude maximale observée, bien qu'elle soit inférieure à l'observation de la correction du signal enregistré (4 ± 1 Pa, figure 2.33).

Conclusions

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la réponse d'hydrophone à basses fréquences, notamment les hydrophones Rafos, utilisés sur les flotteurs MERMAID et dont la réponse à basses fréquences, sous 5 Hz, n'était pas communiquée par le fabricant. Dans le cadre du projet GLOBALSEIS, l'étude des ondes téléseismiques impose une bande de fréquences d'intérêt au-dessous de 5 Hz, la question de la stabilité de la réponse de ces hydrophones à basses fréquences s'est donc posée. Nous avons répondu à cette problématique en proposant deux méthodes de calibration d'hydrophone à basses fréquences, une «dynamique» et une «statique», appliquées aux deux modèles d'hydrophones Rafos.

Nous avons dans un premier temps énoncé les règles de dimensionnement de bassins de calibration en fonction des fréquences d'étude considérées et présenté les principales méthodes de calibration à hautes et basses fréquences. Dans un deuxième temps, nous avons présenté et finalisé la méthode de calibration dynamique dont un problème de non répétabilité des signaux avait empêché la concrétisation. La finalisation de la carte électronique scientifique des flotteurs MERMAID, ainsi que la présence de bruits dans les signaux acquis avec la méthode dynamique, nous ont convaincus de faire évoluer notre méthode vers une méthode statique. Cette méthode, présentée en troisième partie, nous a ainsi permis de proposer une étude de la chaîne d'acquisition complète : l'hydrophone associé à la carte électronique avec la détermination des pôles et zéros du système. Nous avons étudié les cas concrets de deux séismes (Barcelonnette le 07/04/2014 et Hokkaido le 10/04/2014), ce qui nous permet de faire un parallèle entre les amplitudes des sismogrammes (counts) et les variations de la pression enregistrée (Pa).

Nous avons présenté ici deux méthodes robustes de calibration d'hydrophone à basses fréquences, pouvant s'appliquer à un hydrophone unitaire et/ou associé à une carte d'acquisition et dont les principales caractéristiques sont regroupées dans le tableau [2.5](#).

Domaines / Etudes		Méthode dynamique	Méthode statique
<i>Etude</i>	Etude de	Hydrophone	Hydrophone / Hydrophone + carte électronique d'acquisition
	Appliquée à	Rafos I	Rafos II
<i>Mise en oeuvre mécanique</i>	Eléments conçus	Principe mécanique : système de poulie	Principe mécanique : usinage du caisson de calibration en polyacétal (POM-C) et assemblage de l'électrovanne et colonne d'eau
	Coût	+ Moteur	++ Second capteur de pression, matière et usinage du caisson
<i>Mise en place expérimentale</i>	Environnement	Calme obligatoire	Calme obligatoire
	Protocole	Respect obligatoire	Respect obligatoire
	Mise en place	Facile	Nécessité de remonter le principe entre deux jeux d'expériences et de vérifier l'absence de bulles d'air
	Entre 2 expériences	Réinitialisation de la profondeur de l'hydrophone par rotation inverse de la poulie	Purge du système et réajustement de la colonne d'eau additionnelle
<i>Traitement du signal</i>	Type	En amortissement critique	En amortissement critique et/ou pseudocritique
	Qualité du signal	Bruité, oscillations présentes au début et à la fin de la descente de l'hydrophone dans l'eau	Bonne
	Code	Matlab	Fortran
<i>Etat de l'art</i>	Méthodes analogues	Levin, 1973 . Nous considérons une période d'un signal contrairement à cette méthode qui utilise un signal périodique. Un exemple de signal n'est pas communiqué, néanmoins le principe mécanique constitué d'une épingle doit entraîner un amortissement des mouvements ascendants/descendants de l'hydrophone dans l'eau, réduisant les perturbations du signal que nous observons avec notre méthode.	Golenkov, 1972 . Cette méthode est également basée sur l'étude d'un signal périodique, contrairement à nous, qui considérons l'équivalent d'une période du signal. Nous n'utilisons pas de vibreur. Enfin, notre tube de connection entre le caisson et la colonne d'eau additionnelle est réduit à son minimum afin d'éviter que la transmission de la pression de la colonne d'eau ne soit absorbée par l'élasticité du tube.

TABLEAU 2.5 – Comparaison des deux méthodes de calibration développées dans ce chapitre.

Chapitre 3

Test des flotteurs MERMAID en bassin Ligure

Sommaire

Introduction	131
I Zone d'étude	132
II Présentation des données	137
1 Campagne océanographique GROSMarin	141
a Présentation de la campagne GROSMarin	141
b Traitement des données	143
i Procédure de sélection des événements	143
ii Protocole de lecture de phase des données GROSMarin	144
2 Stations terrestres permanentes	146
a Les stations françaises	146
b Les stations italiennes	149
3 Campagne des flotteurs MERMAID	151
a Traitement des données de la campagne MERMAID	153
i Etude de la dérive d'horloge	153
ii Etude de la dérive en surface et en profondeur des flotteurs	154
iii Etude des séismes sans remontée automatique	160
b Présentation des données pour l'inversion	164
III Inversion tomographique	165
1 Principe de l'inversion tomographique	165
2 Les étapes de l'inversion tomographique	167
IV Résultats	169
1 Étude paramétrique	169
a Etude de l'amortissement en dehors de la zone d'étude	170
b Etude de l'influence du rayon de la zone d'étude	170
c Etude de l'influence des paramètres d'amortissement et de lissage	170
2 Tests de résolution	174
a Tests de résolution en damier	174
b Tests de résolution en sphère gaussienne	182
3 Solutions	182
a Comparaison aux travaux de Piromallo et Morelli, 2003	186
b Comparaison aux travaux de Spakman et Wortel, 2004	189
Discussion et perspectives	192

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la validation de l'intégration de données acquises par les flotteurs MERMAID à l'aide d'une étude tomographique. Cette application est basée sur la théorie des rais et l'étude des résidus des temps de trajets des ondes P , par lecture de phase manuelle et en comparaison à un modèle de référence. Nous appliquons notre étude au bassin Ligure, en mer Méditerranée, où de nombreuses études tomographiques préalables contraignent la zone. La proximité géographique du bassin s'est également avérée un point stratégique, facilitant les déploiements et récupérations des flotteurs.

Dans cette étude, nous disposons de trois jeux de données : des stations terrestres permanentes (84 %), des stations de fond de mer OBS (13 %) de la campagne GROSMarin et des flotteurs MERMAID (3 %), nous permettant de comparer les délais observés, et d'une façon encore préliminaire, le gain de résolution des images tomographiques obtenues à partir de chacun d'entre eux et notamment de comparer des jeux des données marines et terrestres.

Après une introduction générale sur le bassin Ligure, nous présenterons la méthodologie de pré-traitement des données et le protocole tomographique. Nous introduirons en détails les spécificités liées à l'utilisation du nouveau type de données des flotteurs MERMAID dans une inversion tomographique. Nous analyserons la précision de ces données et discuterons les images préliminaires obtenues en termes de résolution. Nous les comparerons ensuite avec les études de [Piromallo et Morelli, 2003](#) et [Spakman et Wortel, 2004](#).

I. Zone d'étude

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la structure profonde de la mer Ligure, située en mer Méditerranée occidentale (figure 3.1). Le bassin s'étend du sud-est de la France au nord-ouest de l'Italie, dans le Golfe de Gênes et longe la Corse. Le bassin correspond à la terminaison nord-est du bassin Liguro-Provençal qui s'étend jusqu'aux îles Baléares.

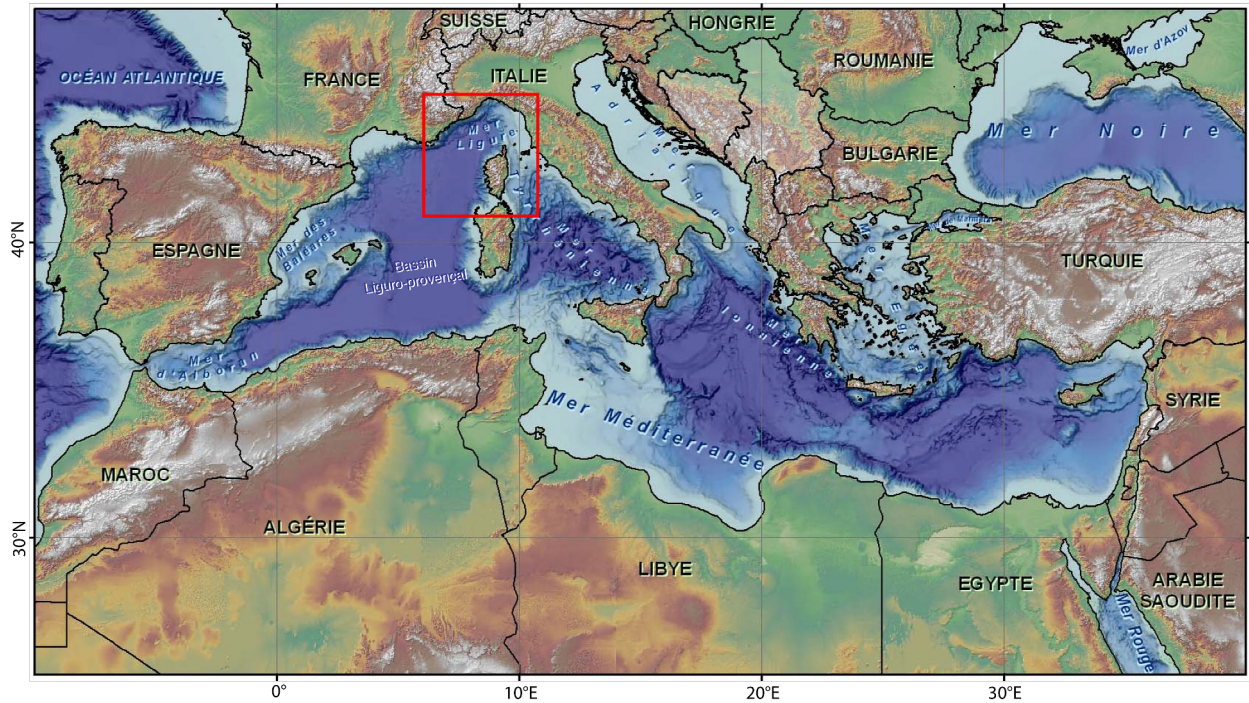


FIGURE 3.1 – Carte générale de la Méditerranée. Modifiée d'après Géoazur - GEBCO - GTOPO30.

La formation du bassin Ligure, initiée à l'Eocène supérieur, est le résultat du retrait vers l'est du panneau plongeant africain, résultant de la collision des plaques Eurasie et Afrique, et de la rotation anti-horaire du bloc Corse-Sardaigne. L'évolution géodynamique du bassin Ligure est exposée en figure 3.2 (synthèse d'après Westphal *et al.*, 1976, Réhault *et al.*, 1984, Malinverno et Ryan, 1986, Gueguen *et al.*, 1998, Jolivet et Faccenna, 2000, Faccenna *et al.*, 2001a, Faccenna *et al.*, 2001b, Speranza *et al.*, 2002, Rollet *et al.*, 2002, Stampfli et Borek, 2004, Goes *et al.*, 2004, Gorini *et al.*, 2005, Schettino et Turco, 2006, Jolivet *et al.*, 2006, Gattacceca *et al.*, 2007, Jolivet *et al.*, 2008b, Jolivet *et al.*, 2008a et Carminati *et al.*, 2012).

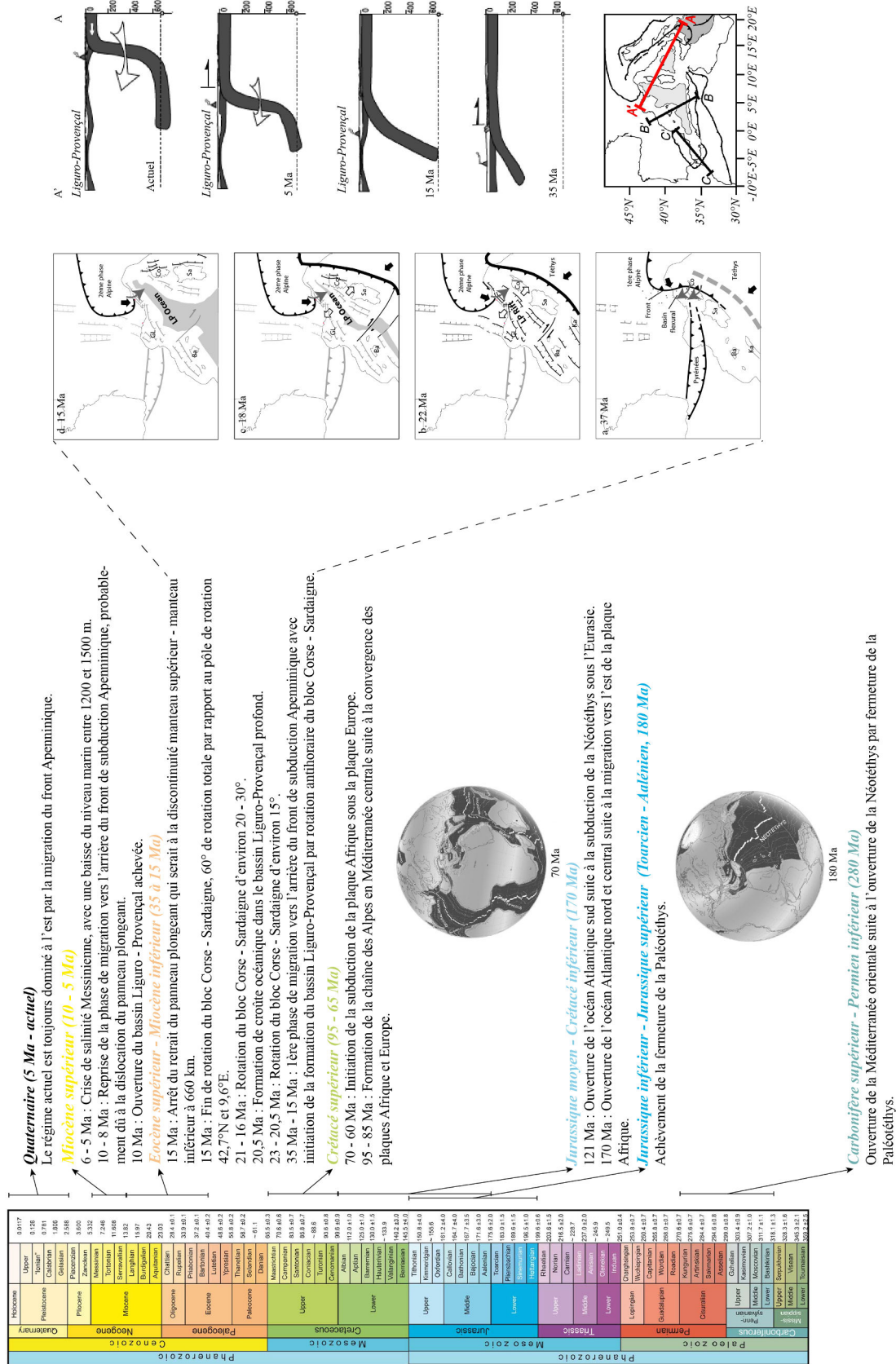


FIGURE 3.2 – Evolution géodynamique du bassin Ligure. Figures modifiées d'après Sage *et al.*, 2011 et Faccenna *et al.*, 2004. Synthèse d'après Westphal *et al.*, 1976, Réhault *et al.*, 1984, Malinverno et Ryan, 1986, Gueguen *et al.*, 1998, Jolivet et Faccenna, 2000, Faccenna *et al.*, 2001a, Faccenna *et al.*, 2001b, Speranza *et al.*, 2002, Rollet *et al.*, 2002, Stampfli et Borek, 2004, Goes *et al.*, 2004, Gorini *et al.*, 2005, Schettino et Turco, 2006, Jolivet *et al.*, 2006, Gattacceca *et al.*, 2007, Jolivet *et al.*, 2008b, Jolivet *et al.*, 2008a et Carminati *et al.*, 2012.

La morphologie actuelle du bassin Ligure est illustrée en figure 3.3 (Rollet *et al.*, 2002). Ce dernier est constitué de marges passives asymétriques composées de blocs basculés. En se déplaçant vers les plaines abyssales, un domaine transitoire peu documenté borde un domaine océanique. Dans le bassin profond, aucune série d'anomalie magnétique linéaire n'a été clairement identifiée, qualifiant la croûte océanique d'atypique. Néanmoins, l'ensemble du bassin est affecté d'épisodes volcaniques tholéïtiques qui permettent de dater le bassin entre $18 \pm 0,5$ et 17,5-16 Ma. La partie centrale du bassin est recouverte d'une couche importante de sédiments d'environ trois kilomètres.

Le bassin présente une activité sismique de magnitude faible à modérée (figure 3.4), en moyenne inférieure à $M_w < 4$, même si plusieurs événements de magnitudes supérieures à $M_w = 4$ ont été observés.

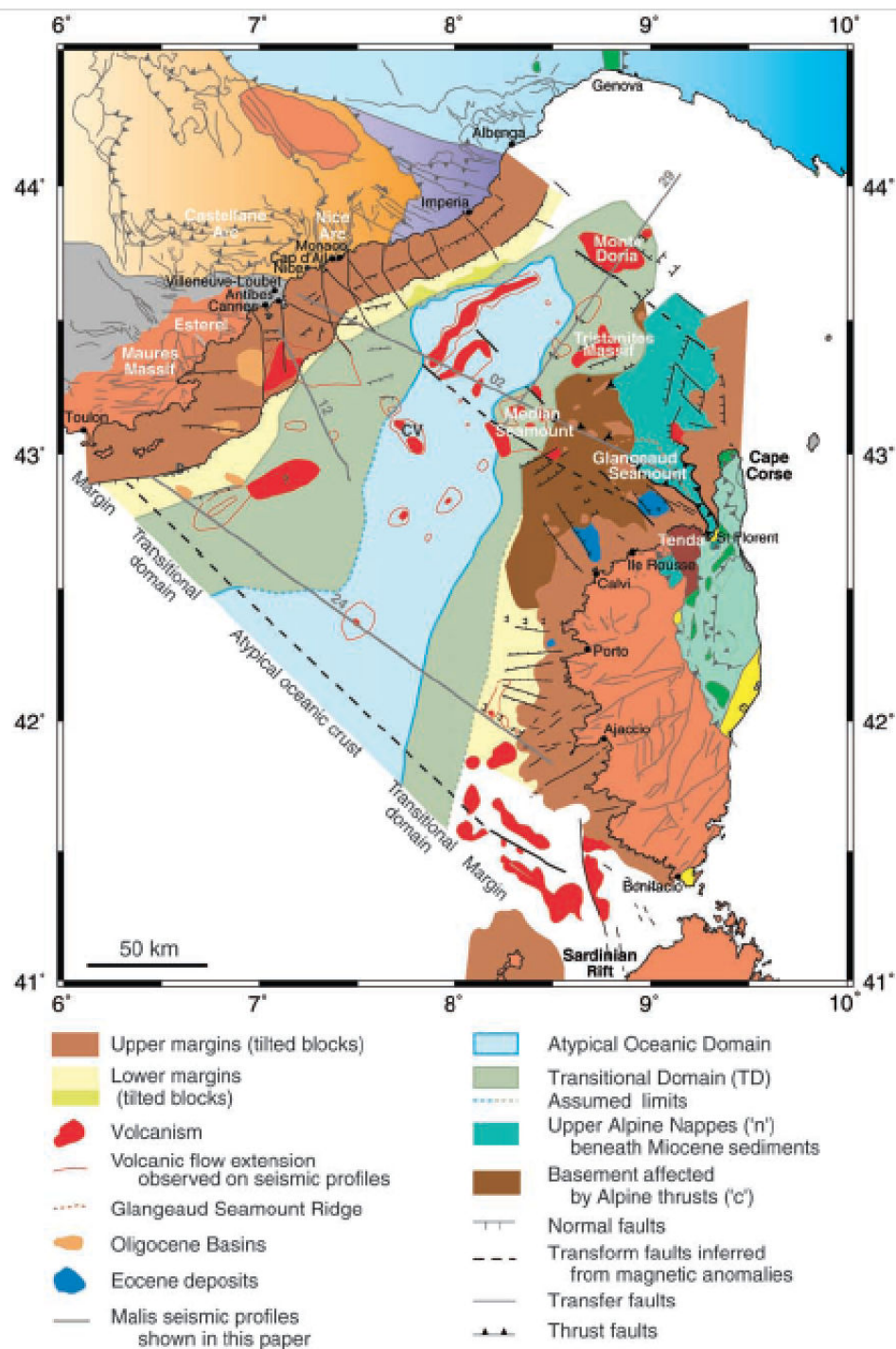


FIGURE 3.3 – Carte géologique du bassin Ligure. D'après [Rollet et al., 2002](#).

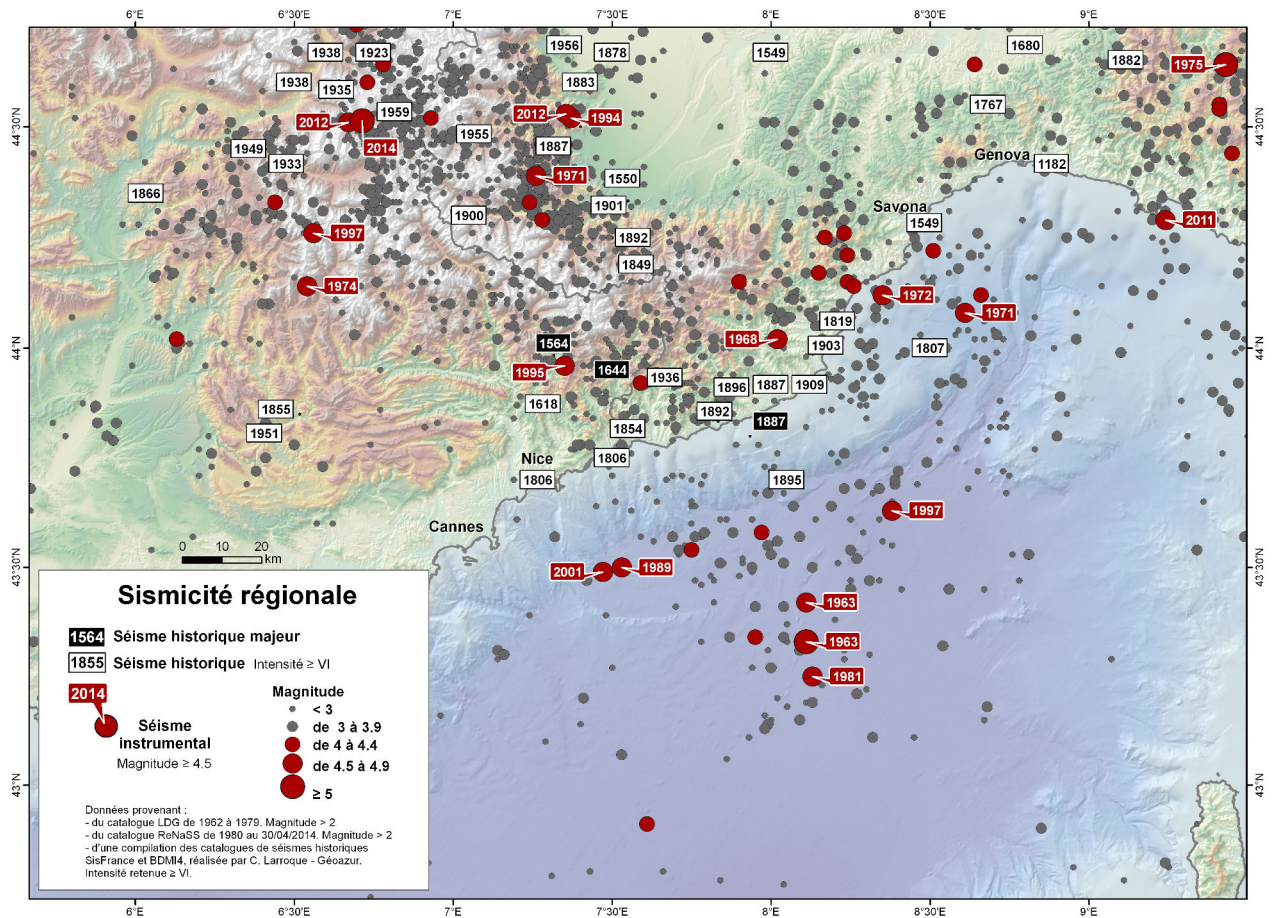


FIGURE 3.4 – Carte de la sismicité du bassin Ligure. D’après Géoazur - ReNaSS - LDG - SisFrance - BDM14.

II. Présentation des données

Au cours de ce travail, nous avons étudié les données de stations sismologiques terrestres et marines. Les stations terrestres sont issues des réseaux permanents français et italien (triangles noirs sur la figure 3.5), les stations marines sont divisées en deux types, les OBS de la campagne GROSMarin (Dessa *et al.*, 2011, Dessa, 2009) et les flotteurs MERMAID (respectivement en triangles gris et cercles colorés sur la figure 3.5). Nous avons également utilisé les données de la station marine ANTARES (ASEAF), celle-ci est représentée par un triangle noir car elle appartient au réseau de stations françaises.

Nous avons utilisé un catalogue de 199 événements ($4,8 \leq M_w \leq 8,2$, distance épicentrale $< 105^\circ$), dont la couverture globale est illustrée en figure 3.6. Un zoom sur le réseau d'étude est illustré en figure 3.7.

Le tableau 3.1 présente la répartition des séismes étudiés, en fonction des années et du type de station. Le tableau 3.2, quant à lui, présente le recoupement des séismes entre les différents réseaux de stations considérés, également en fonction des années. Bien que quatre réseaux différents aient été utilisés, il n'a pas été possible d'observer des événements enregistrés concomitamment par les quatre réseaux. En effet, la campagne GROSMarin a été réalisée en 2008 et les flotteurs MERMAID ont été déployés en mars 2014. Nous utilisons les données obtenues des mois de mars à septembre 2014 pour évaluer la fiabilité des données des flotteurs.

Années	Evènements	Françaises	Italiennes	MERMAID	GROSMarin
2008	36	15	17	0	24
2009	7	6	2	0	0
2010	20	9	17	0	0
2011	40	17	38	0	0
2012	29	9	26	0	0
2013	30	11	30	0	0
2014	37	22	11	27	0
TOTAL	199	89	141	27	24

TABLEAU 3.1 – Répartition des événements en fonction des années et du type de station. Les troisième et quatrième colonnes représentent les stations terrestres permanentes françaises et italiennes. Les deux dernières colonnes représentent les événements aux stations marines, flotteurs MERMAID et OBS de la campagne GROSMarin.

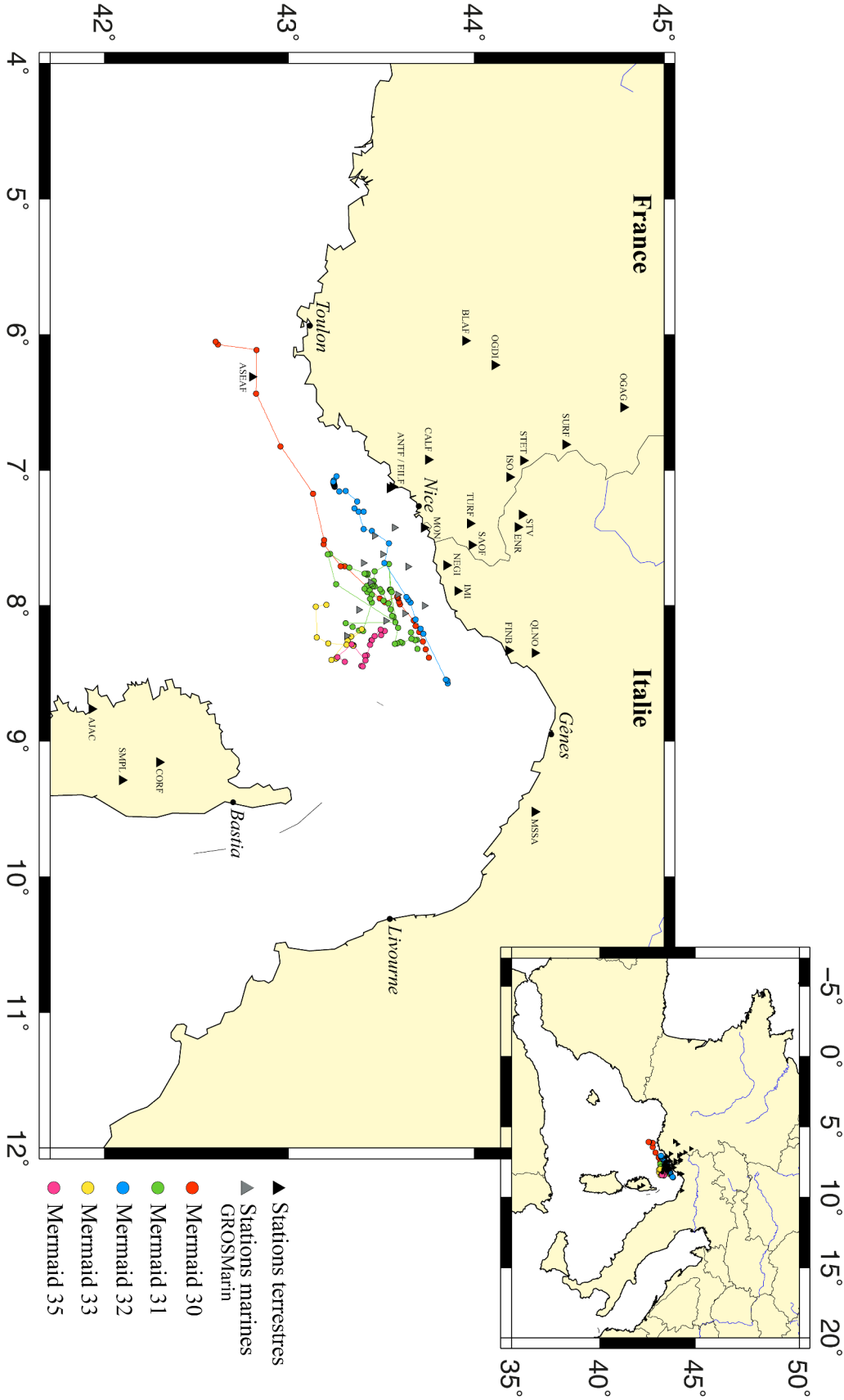


FIGURE 3.5 – Carte du réseau des stations utilisées au cours de cette étude. La station ASEAF est représentée par un triangle noir car elle appartient au réseau de stations françaises bien qu'elle soit une station marine. Les cercles colorés représentent les trajectoires des flotteurs MERMAID et leurs localisations à chaque remontée en surface.

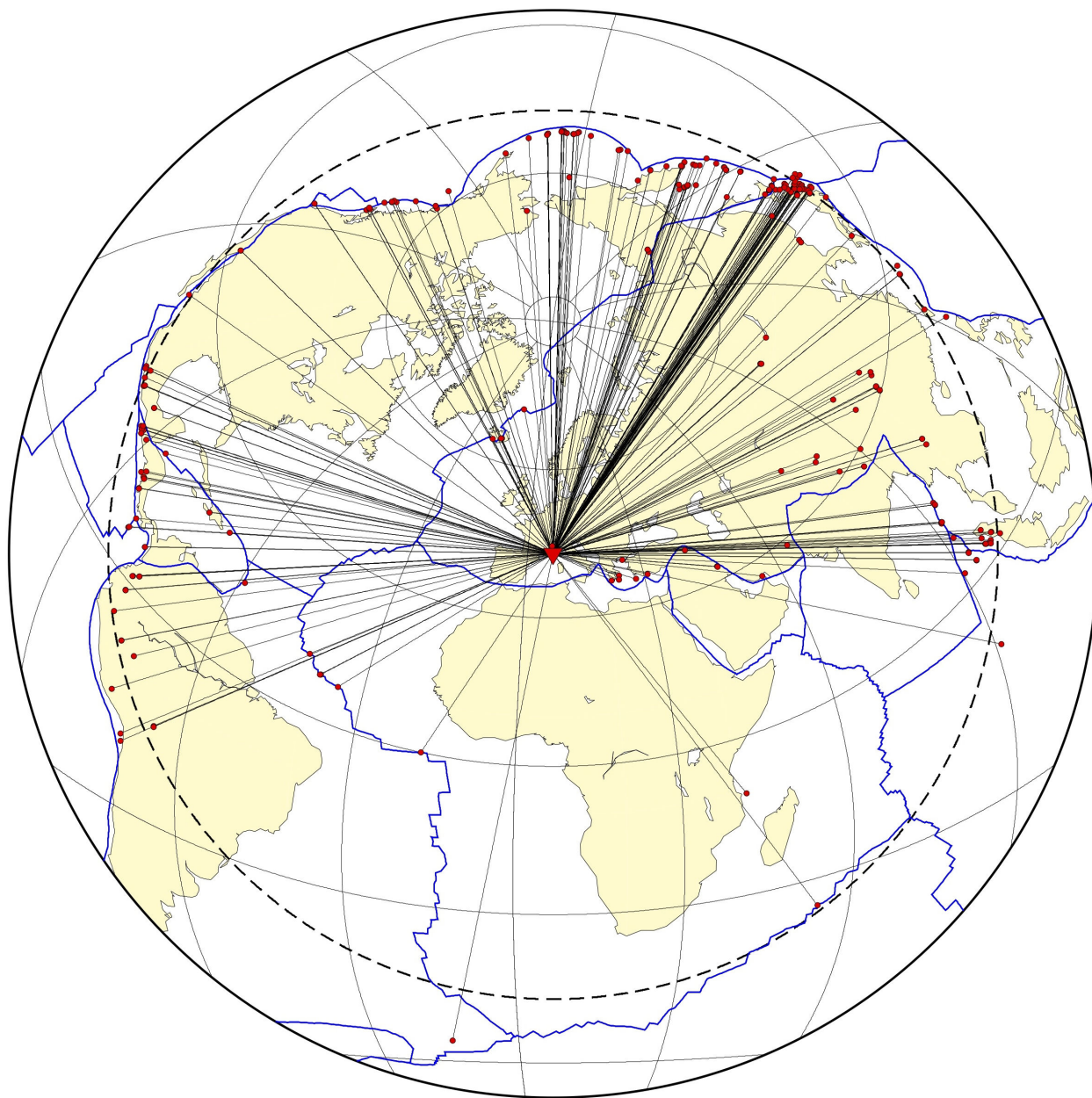


FIGURE 3.6 – Répartition des 199 séismes utilisés lors de ce travail. Le cercle en pointillés représente la distance épacentrale de 90° centrée sur notre zone d'étude.

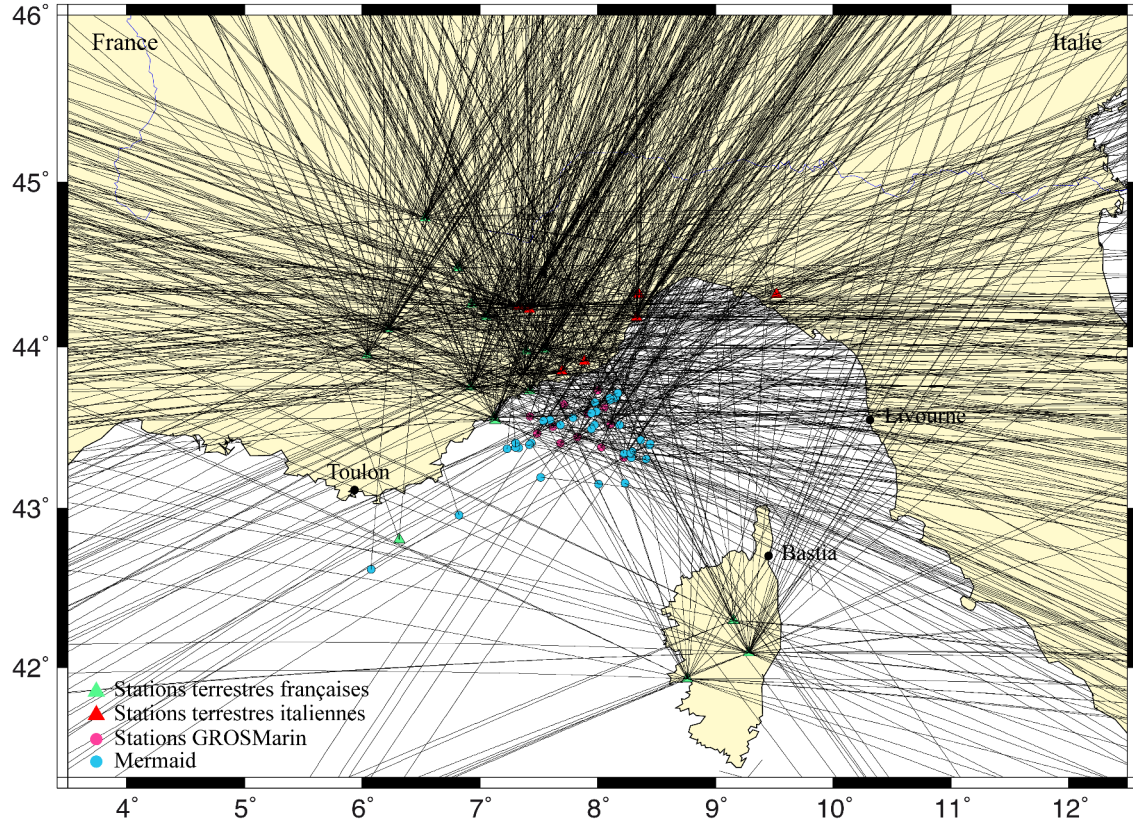


FIGURE 3.7 – Répartition, sous le réseau considéré, des 199 séismes utilisés lors de ce travail ($4,8 \leq M_w \leq 8,2$, distance épicentrale $< 105^\circ$).

Années	3 recoupements	2 recoupements	Aucun recoupement
2008	6	8	22
2009	0	1	6
2010	0	6	14
2011	0	15	25
2012	0	6	23
2013	0	11	19
2014	2	21	14
TOTAL	8	68	123
%	4	34	62

TABLEAU 3.2 – Recoupements des évènements étudiés en fonction des années et des réseaux considérés. La deuxième colonne représente le nombre et la répartition dans le temps des séismes ayant été enregistrés par trois réseaux différents. La troisième colonne représente également cette répartition pour deux réseaux différents, enfin la quatrième colonne représente les séismes ayant été enregistrés par un seul réseau.

1. Campagne océanographique GROSMarin

a. Présentation de la campagne GROSMarin

La campagne GROSMarin s’est déroulée du 19 avril au 4 octobre 2008 sous la direction de Jean-Xavier DESSA pour la partie en mer, de Anne DESCHAMPS et Nicole BÉTHOUX pour la partie à terre (Dessa *et al.*, 2011, Dessa, 2009).

L’un des objectifs de cette campagne était d’étudier la structure profonde de la marge nord-Ligure par l’acquisition de profils de sismique grand-angle, afin de réaliser une tomographie crustale en trois dimensions de la région (Dessa *et al.*, 2011). Un autre objectif était d’étudier l’aléa sismique de cette zone en identifiant les zones actives à terre et en mer. Pour cela, les failles actives de la région ont été instrumentées par 21 OBS, disposés entre Nice et Impéria (tableau 3.3 et figure 3.8). Nous avons utilisé les données de 12 de ces OBS (en caractères gras dans le tableau 3.3).

OBS	Type d’instrument	Longitude (°)	Latitude (°)	Profondeur (m)
1	AWI «Lobster»	8°13.711	43°19.051	2558
2	IRD «Ladybug»	8°10.299	43°25.146	2521
3	AWI «Lobster»	8°06.833	43°31.501	2435
4	IRD Hippocampe	8°03.649	43°37.687	2447
5	AWI «Lobster»	8°00.268	43°43.918	1150
6	IRD Hippocampe	7°51.691	43°41.684	2328
7	IRD «Ladybug»	7°55.119	43°35.326	2445
8	IRD Hippocampe	7°58.293	43°29.075	2465
9	IRD Hippocampe	8°01.640	43°22.640	2467
10	IRD «Ladybug»	7°56.351	43°14.460	2520
11	IRD Hippocampe	7°53.004	43°20.432	2440
12	AWI «Lobster»	7°49.672	43°26.618	2400
13	IRD Hippocampe	7°46.340	43°32.832	2155
14	IRD Hippocampe	7°42.902	43°38.752	1753
15	IRD Hippocampe	7°37.292	43°30.520	2247
16	IRD Hippocampe	7°41.150	43°24.320	2310
17	IRD «Ladybug»	7°44.558	43°18.017	2402
18	IRD «Ladybug»	7°35.736	43°15.560	2338
19	IRD «Ladybug»	7°32.506	43°21.772	1940
20	AWI «Lobster»	7°29.201	43°27.922	2088
21	IRD Hippocampe	7°25.255	43°34.181	1325

TABLEAU 3.3 – Positions et type d’OBS de la campagne GROSMarin. Les OBS «Ladybug» étaient de première génération. Les OBS en caractères gras représentent les OBS utilisés dans notre étude.

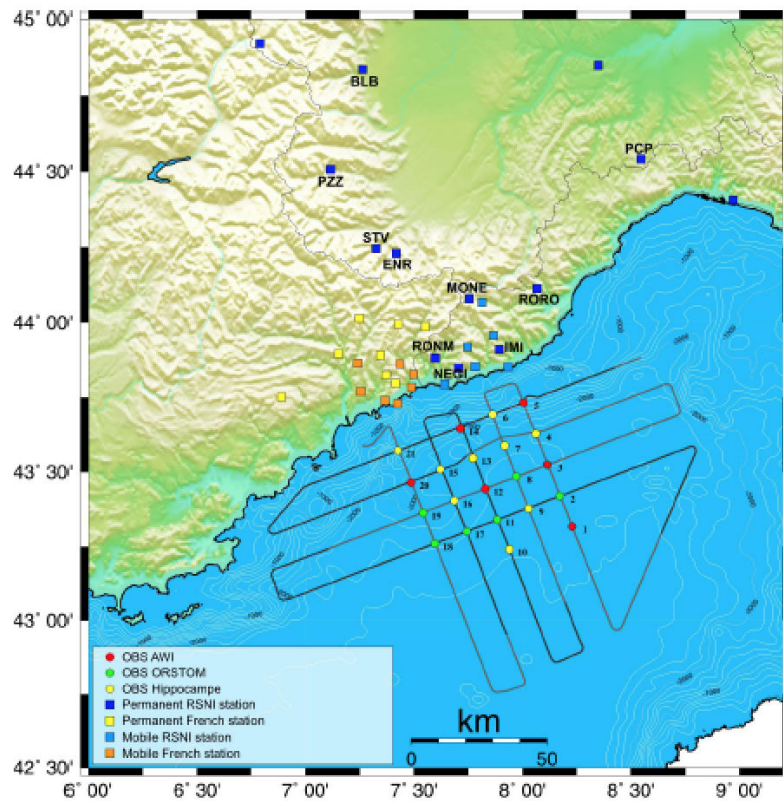


FIGURE 3.8 – Plan de positionnement des OBS de la campagne de GROSMarin. Pour notre étude, nous avons utilisé les données de 12 OBS de la campagne. D’après [Dessa, 2009](#). Les OBS « ORSTOM » correspondent aux OBS « Ladybug ».

Le déploiement des instruments et leur récupération se sont déroulés comme suit :

Etape 1 : du 19 au 28 avril 2008, déploiement de l’intégralité des instruments et tirs de canon à air pour l’acquisition de profils de sismique grand-angle.

Etape 2 : 29 et 30 juin 2008, récupération des OBS «Ladybug», de première génération.

Etape 3 : du 2 au 4 octobre 2008, récupération des OBS Hippocampe et «Lobster».

Trois types d’instruments ont été déployés (tableau [3.3](#) et figures [3.8](#) et [3.9](#)) :

OBS «Lobster» : de l’Alfred Wegener Institute (AWI) illustrés en figure [3.9.a](#) et en rouge sur la figure [3.8](#). Les OBS étaient équipés de capteur large bande longue période (60 s - 50 Hz), type CMG-40T (société Guralp), pour l’acquisition de données sismiques. Des hydrophones basses fréquences HTI-04-PCA/ULF (S_h de 0,01 Hz - 8 kHz, société High Tech) ont également été utilisés. Ces OBS ont été déployés durant cinq mois.

OBS Hippocampe : de l’Institut de Recherche pour le Développement (IRD, anciennement ORSTOM¹), figure 3.9.b et en jaune sur la figure 3.8. Les OBS étaient équipés de trois géophones courte période (4,5 Hz) ou de capteur de bande élargie (60 s), type CMG-40T ainsi que d’hydrophone basses fréquences HTI-04-PCA/ULF. Les instruments ont été déployés durant cinq mois, quatre d’entre eux ne sont pas remontés à la surface.

OBS «Ladybug» : de l’IRD en figure 3.9.c et en vert sur le plan de position de la figure 3.8. Ces OBS, première version des «Ladybug» actuels, étaient équipés de trois géophones courte période (4,5 Hz, société Oyo Geo Space) et d’hydrophone OAS-E2PD qui ne sont actuellement plus commercialisés. L’architecture mono-sphère propre aux «Ladybug» facilite leur mise en œuvre mais réduit leur autonomie à deux mois pour cette mission.

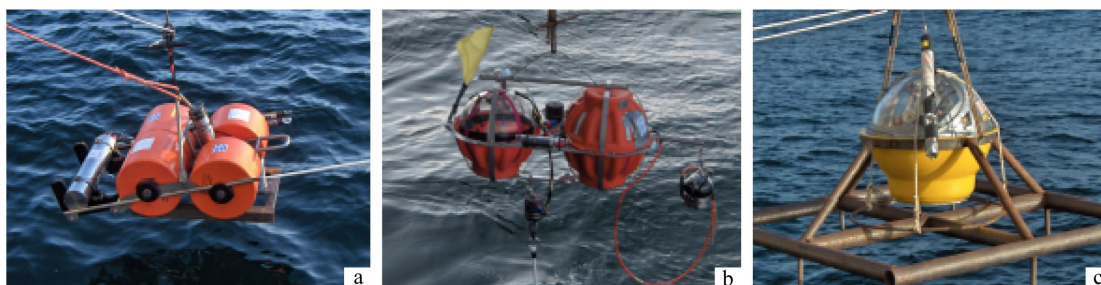


FIGURE 3.9 – Type d’OBS utilisés durant la campagne GROSMarin, (a) OBS «Lobster», (b) OBS Hippocampe et (c) OBS «Ladybug» de première génération.

Afin d’étudier la marge nord-Ligure, un réseau de stations temporaires françaises et italiennes a été déployé à terre (respectivement en orange et bleu clair sur la figure 3.8), complété par les réseaux permanents français et italien (respectivement jaune et bleu foncé sur la figure 3.8). Dans le cadre de notre étude, nous avons étudié les données de 12 OBS.

b. Traitement des données

i. Procédure de sélection des événements

Sur les cinq mois d’enregistrements de la campagne, une liste des séismes ayant eu lieu à cette période a été extraite de la base de données IRIS, 578 événements d’une magnitude comprise entre 4,9 et 7,7 ont été identifiés.

A partir de cette liste, nous avons dans un premier temps sélectionné (tableau 3.4, sélection 1) les séismes de magnitudes supérieures à 5,8, pour s’assurer de la bonne qualité des signaux, et dont

1. Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

la distance angulaire se trouvait avant la zone d'ombre, soient inférieures à 105°. Sur 81 séismes potentiels, 31 évènements ont été retenus.

Etape	Sélection 1		Sélection 2		Sélection 3		Sélection 4		Impossible P	
Effectifs	Total	Sélec.	Total	Sélec.	Total	Sélec.	Total	Sélec.	Total	Sélec.
Avril	6	0	1	0	5	0	0	0	0	0
Mai	21	10	2	0	23	0	10	10	10	8
Juin	15	7	3	2	19	0	9	6	6	6
Juillet	9	5	1	0	4	0	5	5	5	5
Août	18	6	2	0	26	3	9	5	5	2
Septembre	12	3	2	0	8	0	3	3	3	3
Octobre	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Total	81	31	11	2	86	3	36	29	29	24

TABLEAU 3.4 – Procédure de sélection des séismes de la campagne GROSMarin en fonction des mois. La colonne « Total » indique le nombre d'évènements total et la colonne « Sélec. » les évènements sélectionnés après visualisation des sismogrammes.

Dans un deuxième temps (tableau 3.4, sélection 2), nous avons regardé les séismes régionaux de magnitudes comprises entre 5,0 et 5,8, de longitudes comprises entre -3° et 17° et de latitudes comprises entre 33° et 53°. Sur 11 séismes potentiels, deux évènements ont été retenus.

Une troisième sélection (tableau 3.4, sélection 3) a permis d'ajouter des séismes dans une zone peu couverte, soit entre 0° et 100° de longitude et 35° à -90° de latitude, de magnitudes comprises entre 5,0 et 5,8. Sur 86 séismes potentiels, trois évènements ont été retenus.

Une quatrième étape (tableau 3.4, sélection 4) nous a permis de vérifier la présence de la phase P dans les signaux sélectionnés. Sur les 36 séismes sélectionnés précédemment, 29 présentaient l'arrivée de la phase P . Finalement, cinq séismes ont été retirés de la liste, pour des temps d'arrivées jugés trop incertains. Au total, 24 évènements ont été extraits à partir de cette base de données.

ii. Protocole de lecture de phase des données GROSMarin

Afin de garantir le bon déroulement des lectures de la phase P des sismogrammes, nous avons suivi le protocole suivant. Prenons comme exemple le séisme du 5 juillet 2008 ($M_w = 7,7$), en provenance de la mer d'Okhotsk (figure 3.10).

Dans le cas du séisme d'Okhotsk, 12 OBS ont enregistré cet évènement (figure 3.11).

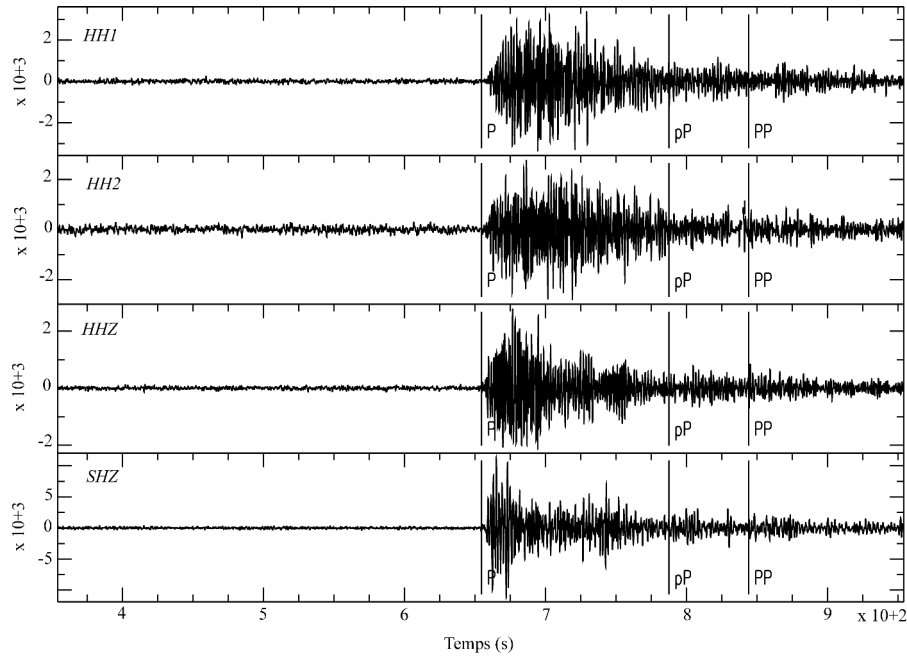


FIGURE 3.10 – Séisme du 5 juillet 2008 ($M_w = 7,7$), en provenance de la mer d’Okhotsk enregistré par l’OBS n°4 sur les composantes horizontale 1 (HH1), horizontale 2 (HH2), verticale (HHZ) et sur le canal hydrophonique (SHZ).

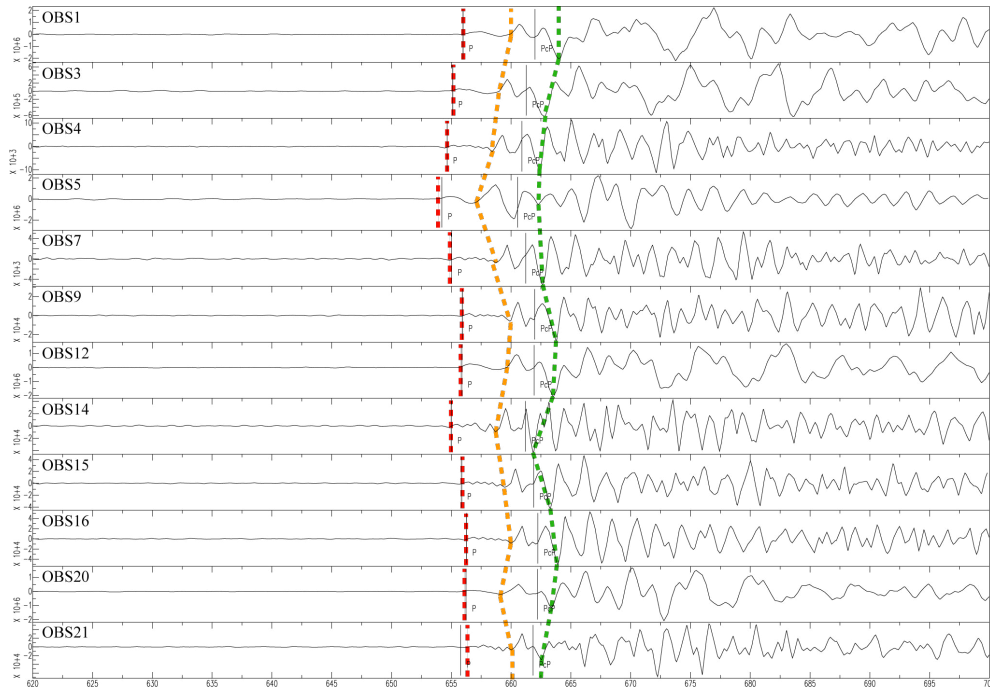


FIGURE 3.11 – Sismogrammes des composantes SHZ du séisme d’Okhotsk du 5 juillet 2008 ($M_w = 7,7$). Les barres verticales noires représentent l’arrivée théorique de la phase P suivant les programmes «*runmsact0*» et «*allsett*». Les traits en rouge, jaune et vert présentent une même forme d’onde sur les différents sismogrammes, le trait rouge étant la lecture finale de la phase P . L’axe des abscisses représente l’axe temporel en secondes et l’axe des ordonnées une unité arbitraire.

Dans un premier temps, nous avons repéré les phases concordantes sur les enregistrements et réalisé une première estimation de la position de l'arrivée de l'onde P sur l'ensemble des sismogrammes (traits rouge, vert et jaune en figure 3.11). Les phases ont par la suite été pointées sous SAC² (traits rouge en figure 3.11) et l'horaire stocké dans un fichier de sortie. Afin de vérifier notre première estimation du temps d'arrivée, nous avons sélectionné un sismogramme de composante SHZ de bonne qualité, dont nous avons étudié le spectrogramme pour confirmer ou infirmer notre estimation.

La couverture de notre zone d'étude par les 24 événements sélectionnés est illustrée en figure 3.12.

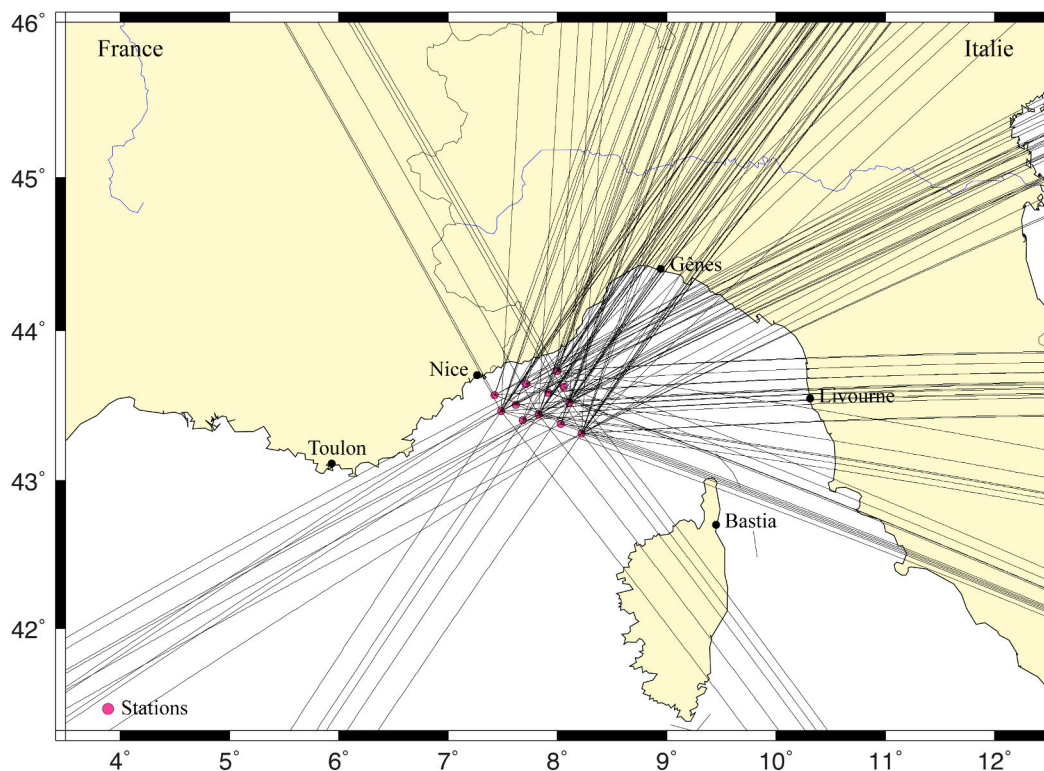


FIGURE 3.12 – Carte de couverture des séismes acquis et sélectionnés durant la campagne GROSMarin.

2. Stations terrestres permanentes

a. Les stations françaises

Nous avons étudié les données de stations terrestres permanentes françaises se situant dans notre zone d'étude. Nous avons sélectionné 18 stations, dont trois en Corse. La répartition des stations est illustrée sur les figures 3.5 et 3.7 et les positions associées sont listées dans le tableau 3.5.

2. Seismic Analysis Code

Stations	Réseaux	Mise en service	Longitude (°)	Latitude (°)	Hauteur (m)	Capteurs
AJAC	RLBP	30/06/2011	8.7630°	41.9279°	27	CMG3ESPC
ANTF	RLBP+RAP	06/01/2003 12/06/2012	7.123°	43.564°	54	CMG40T
ASEAF	RLBP+Antares	12/04/2005	6.314°	42.804°	-2500	CMG3T
BLAF	RéNaSS Aix	16/11/2011	6.045°	43.951°	590	T40
CALF	RLBP+RAP	19/07/1994	6.922°	43.753°	1241	STS2
CORF	RLBP	04/11/2013	9.153°	42.298°	475	CMG3E
EILF	RLBP	08/04/2011	7.1313°	43.5479°	30	CMG40T
ESCA	RLBP+RAP	20/10/2003	7.374°	43.831°	550	CMG40T
ISO	RLBP+RAP	17/09/2003	7.05°	44.184°	910	STS2 2G
MON	RLBP+RAP	13/12/2006	7.425°	43.73°	20	CMG3ESPC
OGAG	RLBP	09/06/1995	6.538°	44.786°	1280	T240
OGDI	RLBP	01/01/1995	6.225°	44.108°	770	T120
SAOF	RLBP+RAP	08/04/1988	7.553°	43.986°	595	STS2
SMPL	RLBP+RAP	22/10/1996	9.285°	42.094°	405	STS2 2G
STET	RLBP+RAP	27/11/1996 15/12/2008	6.929°	44.259°	1200	STS2
SURF	RLBP	13/07/2010	6.812°	44.482°	1815	T120
TURF	RLBP	22/03/2012	7.392°	43.975°	1650	T240

TABLEAU 3.5 – Positions, dates de mise en service et type de capteurs des stations sismologiques terrestres françaises. Avec RLBP pour **R**éseau **L**arge **B**ande **P**ermanent, RéNaSS pour **R**éseau **N**ational de **S**urveillance **S**ismique, RAP pour **R**éseau **A**ccélérométrique **P**ermanent. STS 2G correspond à un capteur STS de 2^{ème} génération. D'après http://websismo.unice.fr/DataSismo_Stations.php.

Ces stations sont équipées de différents types de capteurs, majoritairement CMG40 et CMG3 (tableau 3.5). Deux exemples d'installation pour les stations CORF (Corté, Corse) et EILF (Eilenroc, Antibes) sont illustrés en figure 3.13.

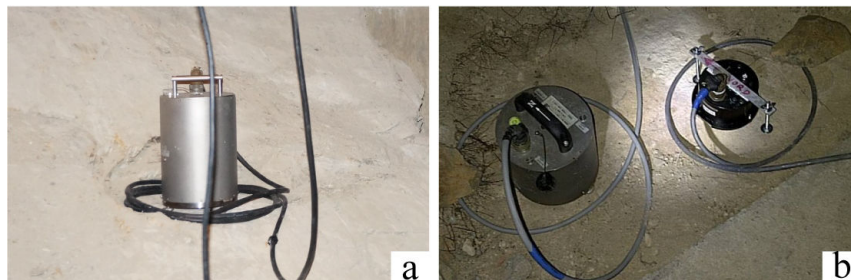


FIGURE 3.13 – Photographies des sismomètres des stations CORF (Corté, Corse, capteur CMG3E) en (a) et EILF (Eilenroc, Cap d'Antibes, capteur CMG40T) en (b). Photographies respectivement de Jérôme Cheze et Didier Brunel.

Un catalogue d'évènements a été dressé à partir de la base de données sismologiques de Harvard

CMT³. Les évènements ayant eu lieu entre le 01/01/2008 et 24/05/2014, de magnitudes comprises entre $6,5 \leq M_w \leq 7,5$, de distances épacentrales entre 0 et 90° ainsi que de profondeurs entre 0 et 1000 km ont été sélectionnés. Ce choix des bornes des magnitudes, nous a permis d'isoler rapidement des sismogrammes potentiels de bonne qualité.

La récupération des données s'est faite à l'aide de l'AutoDRM⁴ de Géoazur disponible à http://websismo.unice.fr/DataSismo_Acces_Donnees.php. Un exemple de sismogrammes est illustré en figure 3.14 pour le séisme du 11 avril 2014 en provenance du Nicaragua ($M_w = 6,6$). La lecture de la phase *P* a été réalisée en suivant la même méthodologie que celle des données de la campagne GROSMarin.

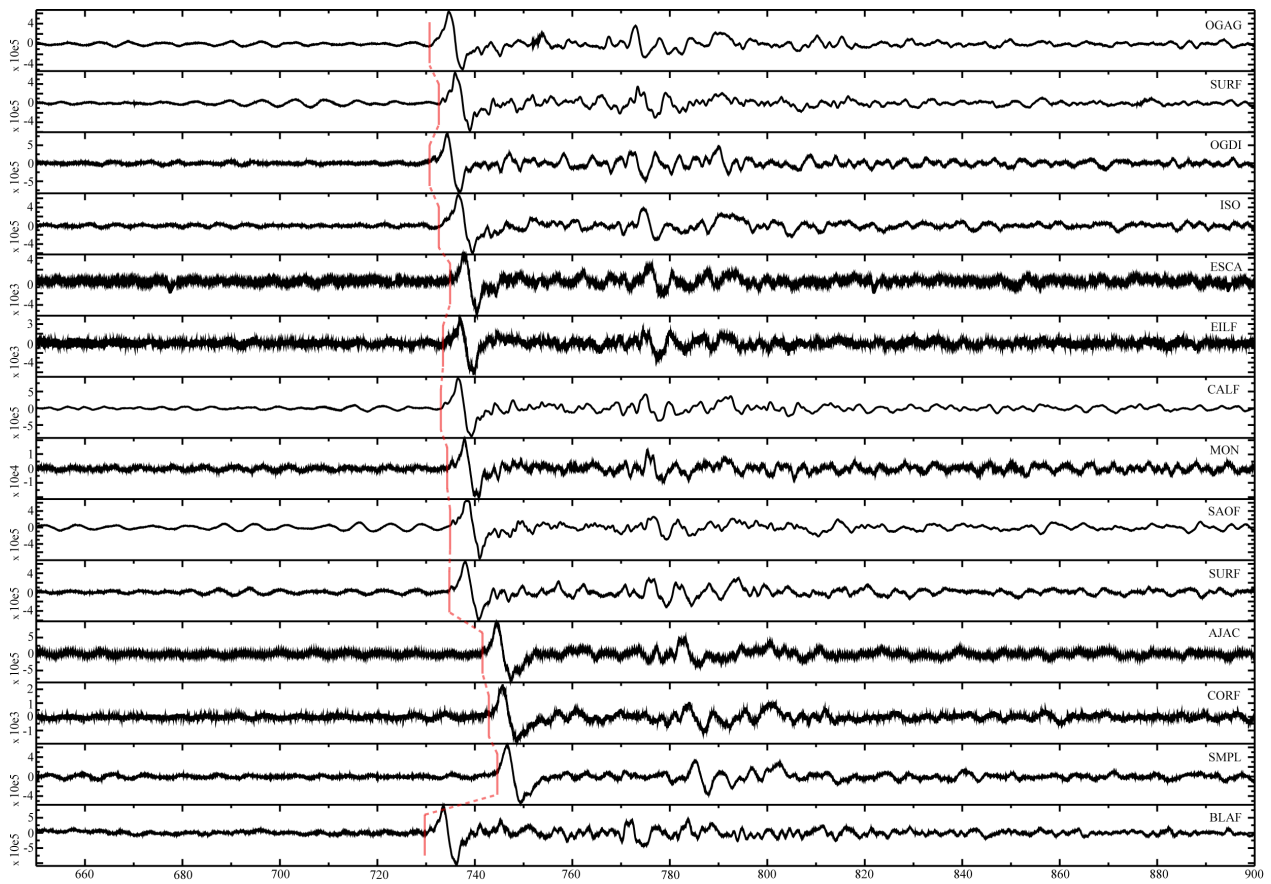


FIGURE 3.14 – Sismogrammes du séisme du 11 avril 2014 ($M_w = 6,6$) en provenance du Nicaragua, enregistré par 14 stations du réseau de stations permanentes françaises. Les traits rouges représentent la lecture finale effectuée. L'axe des abscisses représente l'axe temporel en secondes et l'axe des ordonnées une unité arbitraire.

3. Centroid-Moment-Tensor, <http://www.globalcmt.org>

4. Automatic Data Request Manager

La couverture de notre zone d'étude après l'incorporation de ces données est illustrée en figure 3.15.

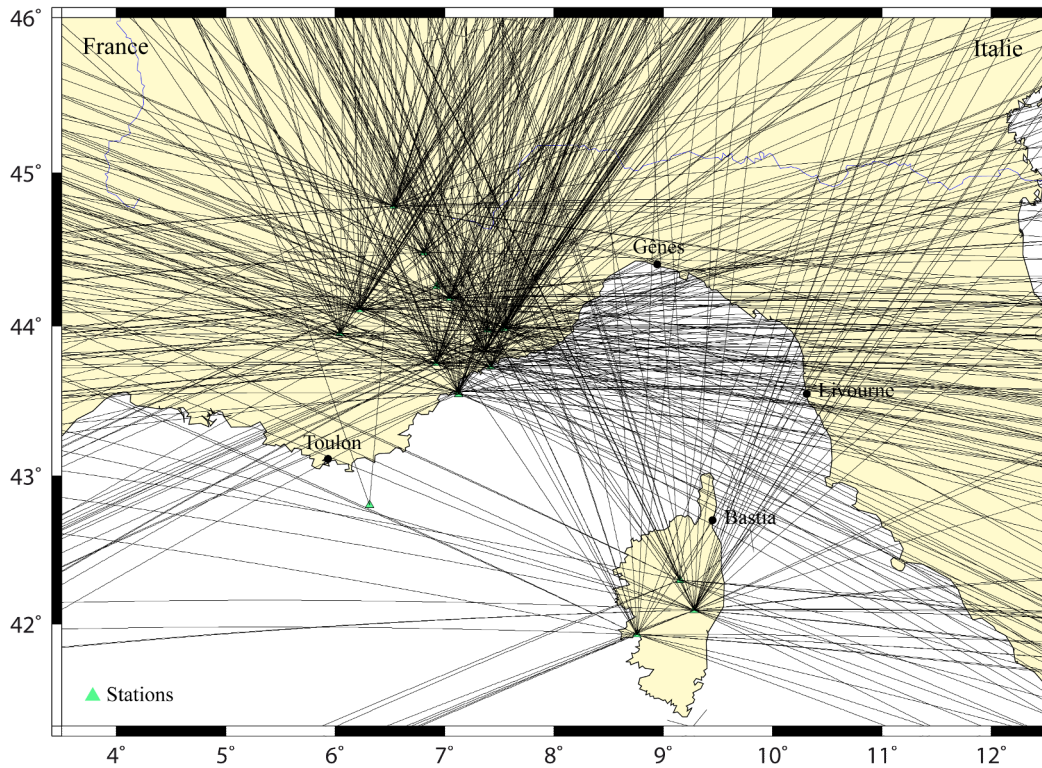


FIGURE 3.15 – Carte de couverture des séismes sélectionnés et enregistrés par les stations permanentes du réseau français.

b. Les stations italiennes

Les données de huit stations permanentes italiennes ont été incorporées à notre jeu de données (tableau 3.6). Nous les avons extraites par requête «*breq_fast*⁵» sur le site ORFEUS⁶ via la passerelle EIDA⁷. Afin de préparer les requêtes, nous avons utilisé le programme «*SplitLab*» sous MATLAB, développé par l'université de Montpellier (Wüstefeld *et al.*, 2008) et disponible à <http://splitting.gm.univ-montp2.fr>.

SplitLab est un programme dont l'interface graphique permet de faciliter des étapes de traitement des données sismologiques, notamment pour l'étude de la biréfringence des ondes de cisaillement («*shear waves splitting*»), en laissant la main à l'utilisateur sur les différentes étapes de pré-traitement.

5. Batch **RE**quests, **FAST**

6. **O**bservatories and **R**esearch **F**acilities for **EU**ropean **S**eismology, <http://www.orfeus-eu.org>

7. **E**uropean **I**ntegrated **D**ata **A**rchive

Une fois les données préparées, les phases P ont été lues en suivant l'approche précédemment développée. Un exemple d'enregistrement est illustré en figure 3.16 pour le séisme du 18 février 2014 ($M_w = 6,4$) en provenance de l'océan Atlantique nord.

Stations	Réseaux	Mise en service	Longitude (°)	Latitude (°)	Hauteur (m)
ENR	GU	17/05/2011	7°4203	44°2267	1040
FINB	GU	19/01/2009	8°3253	44°1775	85
GBOS	GU	04/11/2011	7°8399	44°2416	897
NEGI	GU	09/12/2010	7°7027	43°8462	734
STV	GU	18/05/2006	7°326	44°2455	930
IMI	IV	01/03/2003	7°8932	43°9105	840
MSSA	IV	21/11/2008	9°5174	44°3163	930
QLNO	IV	01/03/2003	8°3459	44°3243	547

TABLEAU 3.6 – Positions des stations sismologiques terrestres italiennes. Avec GU réseau sismique du nord-ouest italien, Génova et IV Réseau national italien (INGV).

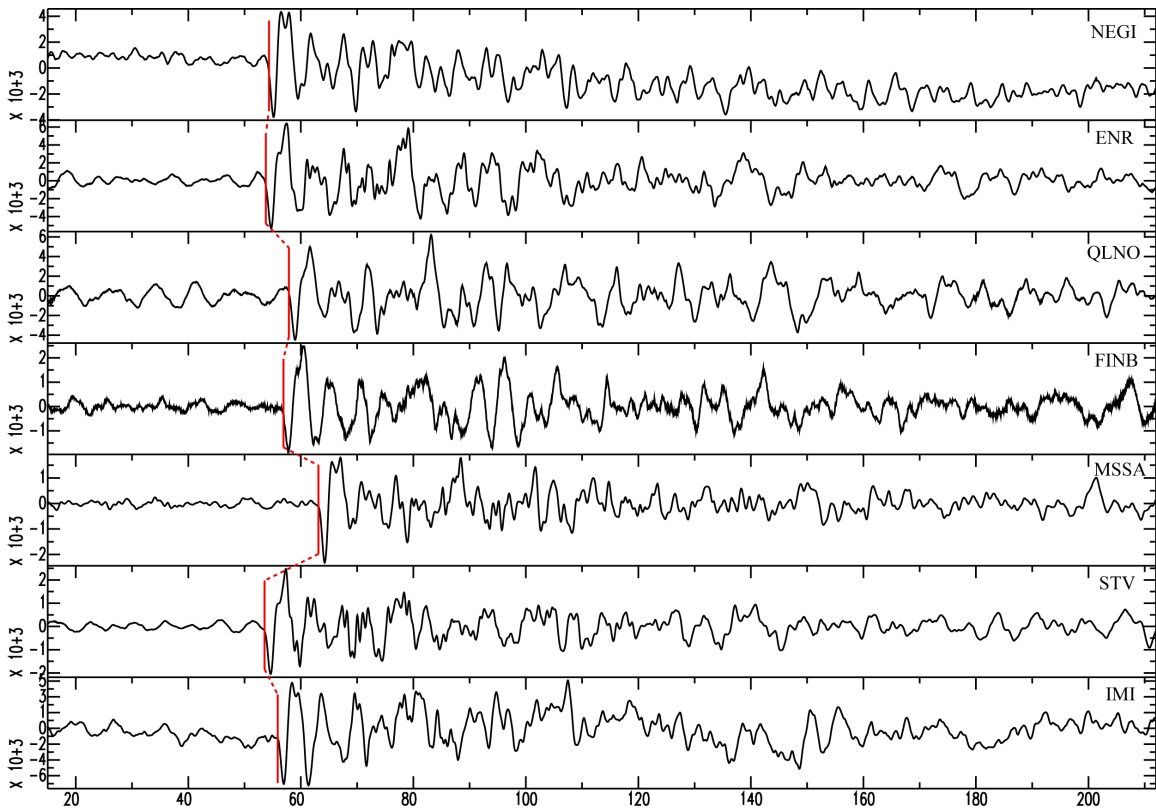


FIGURE 3.16 – Sismogrammes du séisme du 18 février 2014 ($M_w = 6,4$) en provenance de l'océan Atlantique nord et enregistré par 7 des 8 stations du réseau italien. Les traits rouges présentent les lectures finales de la phase P . L'axe des abscisses représente l'axe temporel en seconde et l'axe des ordonnées une unité arbitraire.

La couverture obtenue grâce à l'ajout des données des stations italiennes est illustrée en figure 3.17.

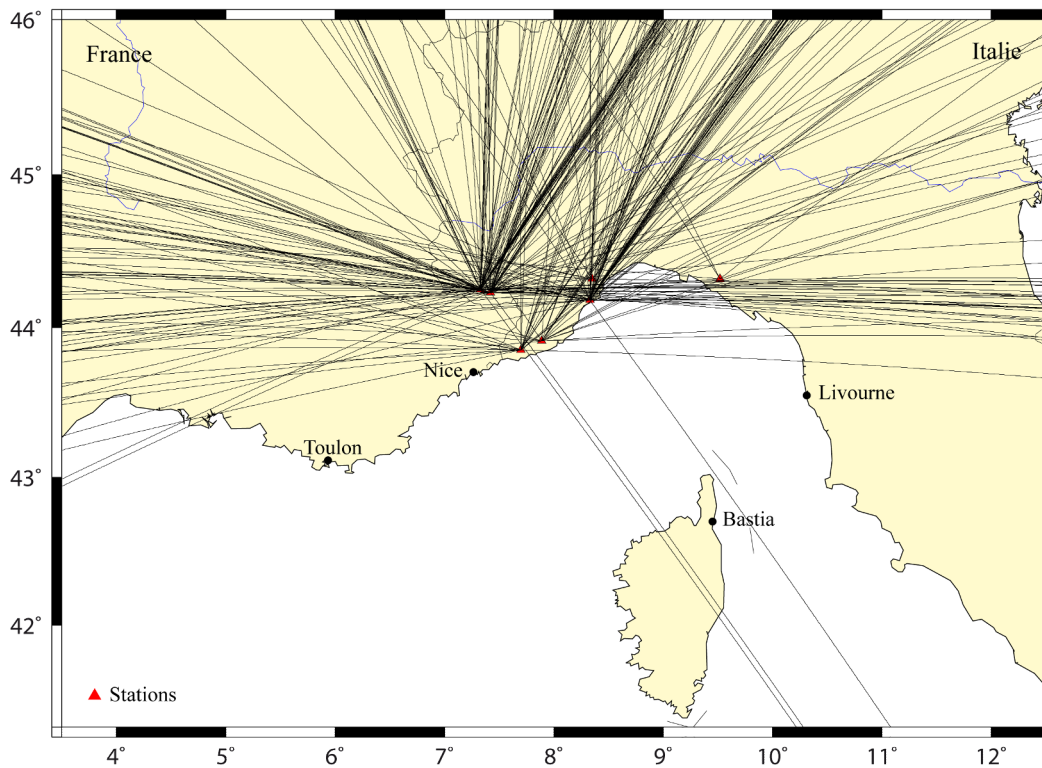


FIGURE 3.17 – Carte de couverture des séismes sélectionnés ayant été enregistrés par les stations terrestres permanentes italiennes considérées.

3. Campagne des flotteurs MERMAID

L'originalité de notre tomographie est d'intégrer des données acquises par des flotteurs profi-
 leurs dérivants, MERMAID. Plusieurs années d'acquisition seraient nécessaires afin d'ajouter des
 données suffisantes pour couvrir la zone entre la Corse et l'emplacement de la campagne GROS-
 Marin. Nous avons eu à disposition trois flotteurs avec une durée de déploiement de six mois, ce
 qui limite la taille du jeu de données. Néanmoins, cette base de données nous a permis de déve-
 lopper une méthode de pré-traitement des données MERMAID. Nous avons également réalisé cette
 étude tomographique préliminaire afin de valider ces données en termes de résidus de temps de tra-
 jet des ondes *P*. Avant de présenter ces données, nous allons nous intéresser aux données du flotteur.

Les données des flotteurs MERMAID sont disponibles à l'adresse : <https://www.geoazur.fr/GLOBALSEIS/Data.html>. Les données de trois zones de déploiement sont disponibles, à savoir le
 bassin Ligure (MERMAID 30, 31, 32, 33 et 35), la mer Méditerranée occidentale (MERMAID 17)
 et l'océan Indien (MERMAID 12, 13, 14 et 16).

Afin de compléter notre base de données, trois flotteurs MERMAID équipés d'hydrophone basses fréquences, type RAFOS II (figure 2.12), ont été déployés depuis le mois de mars 2014, aux dates détaillées dans le tableau 3.7. Les flotteurs M33 et M35 correspondent aux redéploiements des flotteurs M30 et M32.

MERMAID	Déploiements	Récupérations	Durée (jours)	Nombre de séismes enregistrés
M30	14/03/2014	25/06/2014	73	9
M31	14/03/2014	14/09/2014*	284	27
M32	14/03/2014	02/07/2014	80	13
M33	17/07/2014	14/09/2014*	60	6
M35	17/07/2014	14/09/2014*	60	5

TABLEAU 3.7 – Dates des déploiements et récupérations des flotteurs MERMAID (M), nombre de jours d'acquisitions et nombre de séismes enregistrés. (*) La date du 14/09/2014 a été choisie comme date finale pour le traitement des données acquises.

Deux exemples d'enregistrements sont présentés en figures 3.18 et 3.19. Ils représentent respectivement un séisme de Barcelonnette (France, le 7 avril 2014, $M_w = 4,8$) et un télé-séisme des îles Rat (Îles Aléoutiennes, Etats-Unis, le 23 juin 2014, $M_w = 7,9$), enregistrés par trois flotteurs MERMAID.

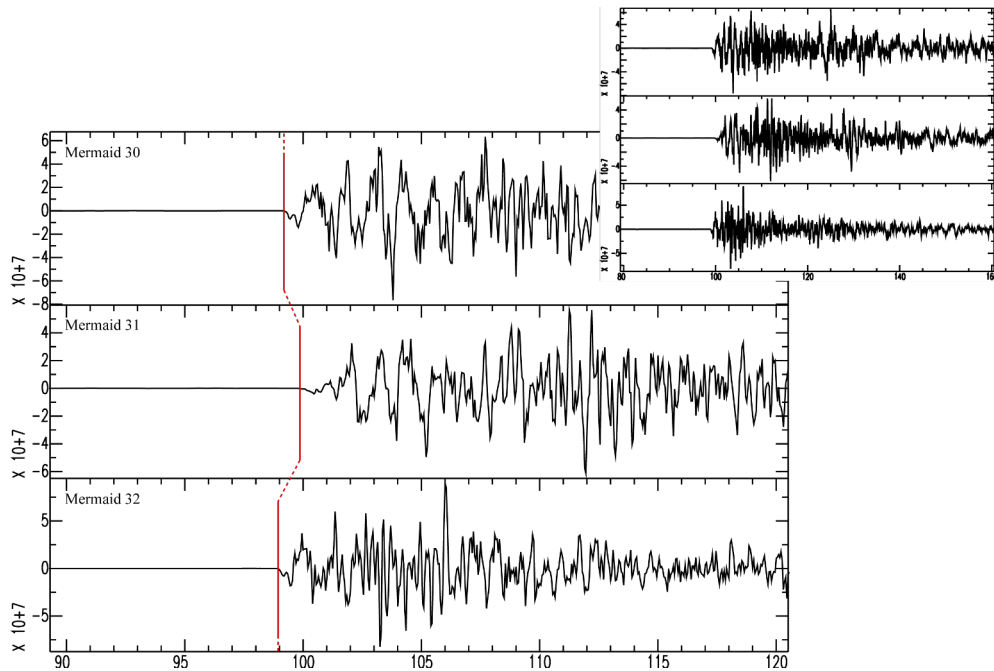


FIGURE 3.18 – Enregistrements des flotteurs MERMAID 30, 31 et 32 du séisme régional de Barcelonnette (France) de magnitude $M_w = 4,8$, le 7 avril 2014 à 12 km de profondeur. L'axe des abscisses représente l'axe temporel exprimé en secondes. L'axe des ordonnées est en unité arbitraire. Les flotteurs M30, M31 et M32 étaient respectivement immergés à 1521, 1499 et 1507 m. Les traits en rouge représentent la lecture finale de la phase P.

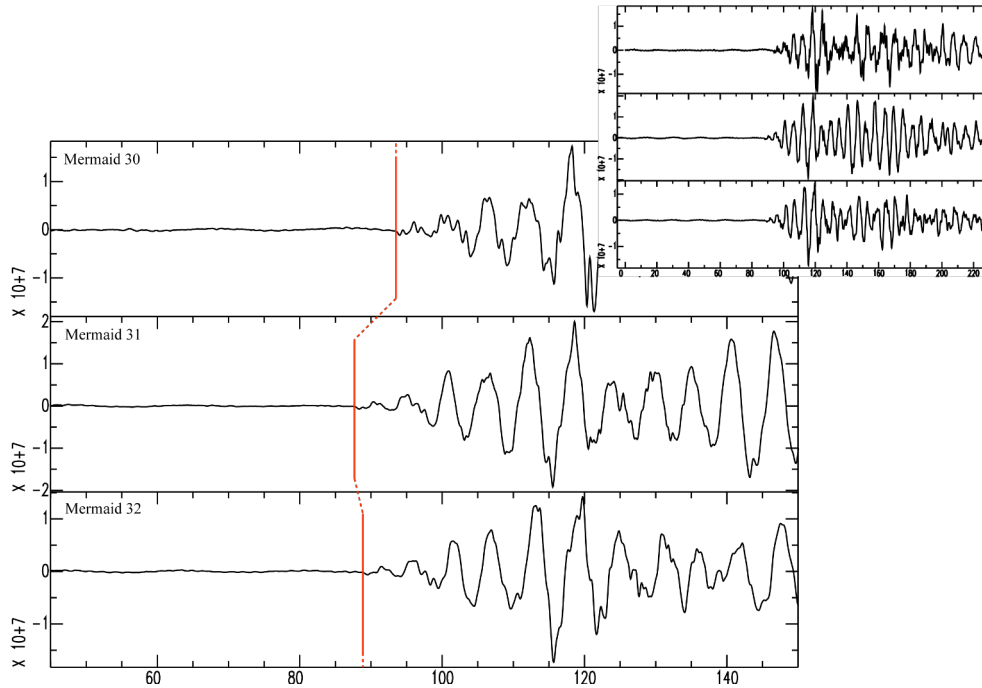


FIGURE 3.19 – Enregistrements des flotteurs MERMAID 30, 31 et 32 du téléseisme des îles Rat (Iles Aléoutiennes, Etats-Unis) de magnitude $M_w = 7,9$, le 23 juin 2014 à 109 km de profondeur. L'axe des abscisses représente l'axe temporel exprimé en secondes. L'axe des ordonnées est en unité arbitraire. Les flotteurs M30, M31 et M32 étaient respectivement immergés à 1566, 1501 et 1496 m. Les traits en rouge représentent la lecture finale de la phase P .

a. Traitement des données de la campagne MERMAID

Afin d'incorporer les données acquises par les flotteurs MERMAID au code d'inversion tomographique, il est nécessaire d'effectuer des corrections. Dans un premier temps, à la différence des stations OBS de fond de mer, les flotteurs MERMAID dérivent dans la colonne d'eau. Il est donc nécessaire de prendre en compte leurs immersions au moment de la détection d'un évènement, de la même façon que les élévations des stations terrestres.

Dans le cas particulier des séismes n'ayant pas déclenché de remontée automatique (remontée d'urgence), la position du flotteur lors de l'enregistrement d'un séisme est actuellement interpolée à partir du point de descente et du premier point de remontée. Il est donc nécessaire de vérifier cette estimation à partir d'une étude de la trajectoire du flotteur en profondeur.

i. Etude de la dérive d'horloge

Les flotteurs MERMAID utilisent une carte d'acquisition dont la dérive de l'horloge doit être corrigée. Cette dernière est faible, mais le gradient de la température entre la surface de l'eau

et la profondeur de stationnement des flotteurs (environ une dizaine de degrés), peut accentuer le phénomène. Après synchronisation, la précision de l’horloge communiquée par le constructeur est d’une microseconde par seconde. Pour observer une dérive d’une seconde, plus de dix jours de mission sont nécessaires. Les horloges des flotteurs sont synchronisées à chaque remontée en surface, soit au maximum tous les dix jours, ce qui nous donne confiance dans les corrections des dérives des horloges. Elles sont automatiquement effectuées et consignées dans le journal de bord des flotteurs. Cependant, la lecture du journal de bord du flotteur M31, a mis en évidence des sauts anormaux d’horloge, dont la source n’est actuellement pas identifiée, ce qui nous a contraint à écarter l’ensemble des délais observés de ce flotteur, soit 30 % des données totales acquises par les flotteurs.

ii. Etude de la dérive en surface et en profondeur des flotteurs

Du fait du caractère dérivant des flotteurs MERMAID, nous avons effectué des études et corrections liées à la dérive dans l’eau. Nous en distinguons ici deux types :

- La dérive de surface, qui correspond au moment où le flotteur se trouve en surface, afin de transférer des données et de recevoir ses ordres de mission.
- La dérive en profondeur, qui correspond à l’immersion entre deux eaux du flotteur et qui est notamment importante lors de l’enregistrement d’un évènement.

Etude de la dérive de surface des flotteurs

L’utilisation de flotteurs MERMAID pour la tomographie étant nouvelle, il nous a fallu nous intéresser à la quantification de la dérive des flotteurs en surface (figures 3.20 et 3.21). On peut s’intéresser à celle-ci pour deux applications :

- Étude de la dérive de surface des flotteurs avant la connexion avec un satellite pour la transmission des données.
- Étude de la dérive de surface des flotteurs afin de quantifier les vitesses de déplacements des courants de surface.

Étude de la dérive de surface des flotteurs avant la connexion avec un satellite

A la fin d’une mission, lorsque le flotteur remonte en surface, l’établissement d’une connexion avec un satellite prend entre 5 à 30 minutes. Durant ce laps de temps le flotteur dérive en surface. Il est donc nécessaire de corriger cette dérive afin de retrouver l’information du point de remontée du flotteur. Pour cela, le flotteur enregistre son heure d’arrivée en surface et une extrapolation linéaire

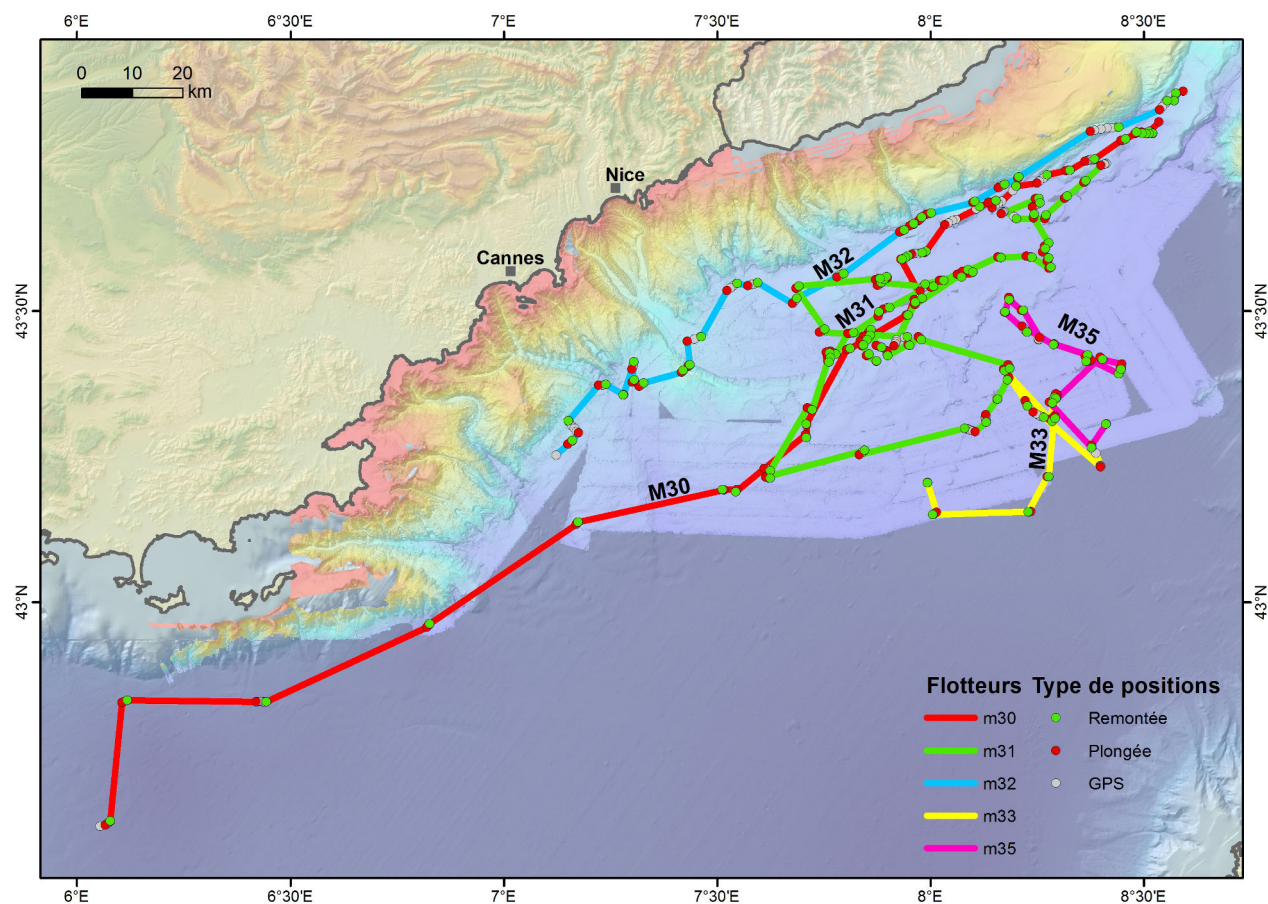


FIGURE 3.20 – Carte des trajectoires des flotteurs MERMAID, depuis leurs déploiements dans le Golfe de Gènes vers les côtes Varoises. Bathymétrie d’après une synthèse des campagnes MALISAR (Migeon *et al.*, 2011, Migeon et Larroque, 2008, Migeon et Larroque, 2007 et Migeon et Larroque, 2006), surimposées à une carte résolue à 100 m (IBCM International Bathymetric Chart of the Mediterranean, en mer et SRTM Shuttle Radar Topography Mission, à terre). D’après J. Trévisan.

est réalisée à partir des points GPS qu’il effectue après sa connexion au satellite. Durant la remontée, nous considérons que sa dérive dans la colonne d’eau est négligeable (Sukhovich *et al.*, 2015). Le maximum de dérive s’effectue dans les premiers mètres à l’arrivée en surface et est fortement dépendante de la zone géographique et des conditions météorologiques. Des observations effectuées lors de récupérations d’OBS montrent des dérives à l’approche de la surface d’un ordre maximum d’une centaine de mètres.

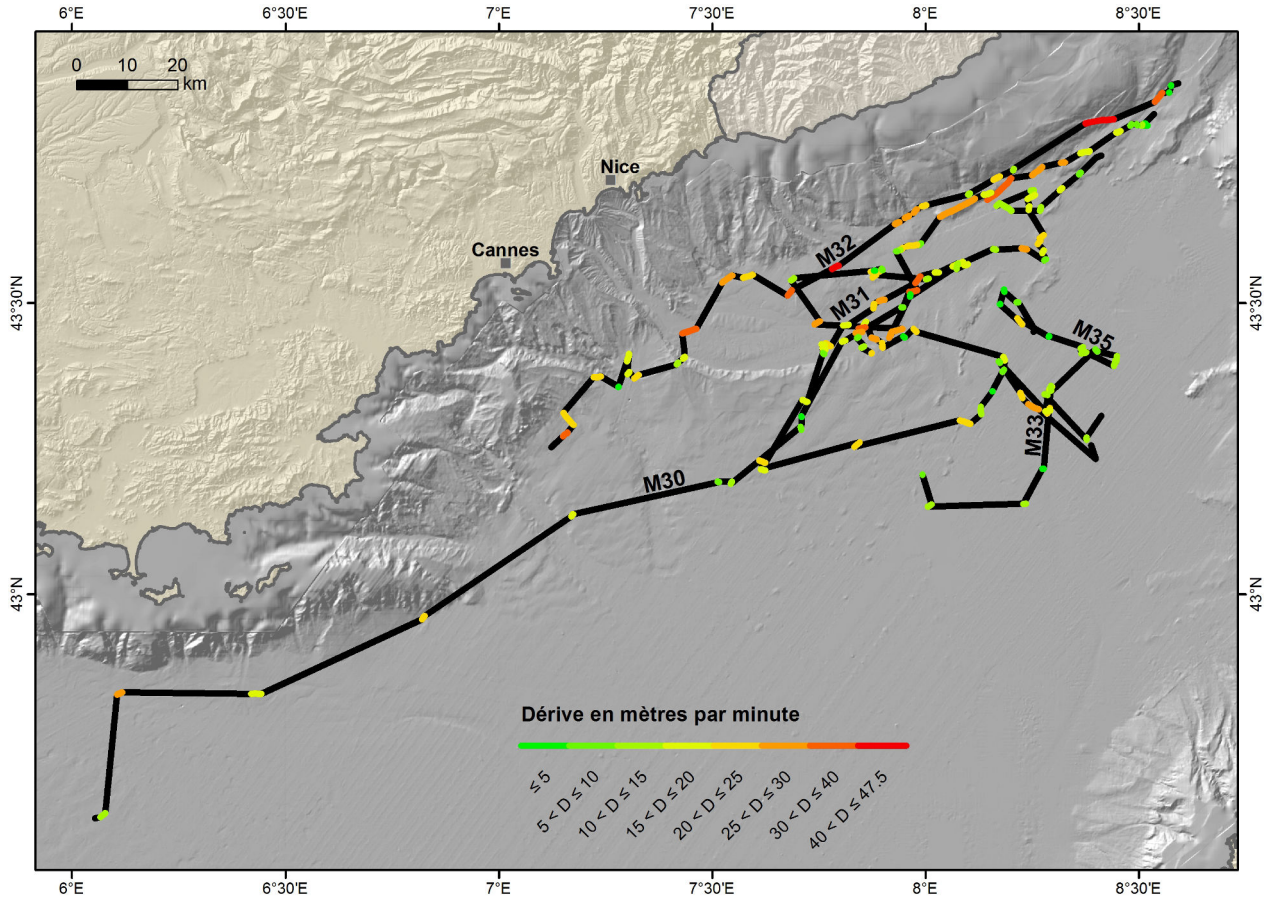


FIGURE 3.21 – Carte de la dérive de surface des flotteurs MERMAID. Les traits en couleur symbolisent la dérive de surface des flotteurs lors de leurs remontées à la surface et les traits noirs la dérive en profondeur. Plus la couleur des traits tend vers le rouge plus les vitesses des déplacements en surface sont importantes. D'après J. Trévisan.

Étude de la dérive de surface des flotteurs afin de quantifier les vitesses des déplacements des courants.

Cette étude correspond à une application océanographique de l'étude de la vitesse du courant en surface. Une fois largués depuis le nord-est du bassin Ligure, les flotteurs ont suivi les courants marins, en particulier le courant Ligure. Ce dernier est un courant puissant évoluant du nord-ouest de l'Italie jusqu'au côtes varoises, avec un maximum de 50 cm/s de vitesse de déplacement (Béthoux *et al.*, 1988, Millot et Wald, 1980).

Dans la période considérée de cette thèse, les flotteurs ont été largués deux fois et en deux endroits différents (figure 3.5, tableau 3.7). La dérive moyenne de surface des flotteurs a été d'environ 1,8 km/jour (vitesse estimée établie à partir des déplacements et durées à la surface des flotteurs M30, M32, M33 et M35). La durée maximale observée d'un flotteur en surface est de 2 h 28 min 47 s.

Les MERMAID 30, 31 et 32 ont été largués au large d'Impéria en Italie, relativement près des côtes. Les flotteurs M33 et M35 ont été largués plus au large, cinq mois plus tard. Les flotteurs largués près de la côte (M30, M31 et M32) ont suivi un trajet côtier alors que les flotteurs M33 et M35, plus au large, ont été piégés par un courant toroïdal de surface.

Il est à noter que le flotteur M30 a subi une importante dérive de surface en comparaison aux flotteurs M31 et M32, largués à la même période.

La dérive de surface (figures 3.20 et 3.21), peut être estimée à l'aide des points GPS effectués lors des emersions des flotteurs. La vitesse de la dérive est estimée à partir des heures et positions des points GPS des remontées, des descentes et des points intermédiaires réalisés (points en vert, rouge et gris sur la figure 3.20). La figure 3.21 présente ces valeurs des dérives des flotteurs en surface en mètres par minute. Plus la dérive de surface est importante et plus la couleur de sa trajectoire tend vers le rouge (figure 3.21). Nous remarquons que lorsqu'un flotteur est proche de la côte, sa dérive de surface est importante (traits orange à rouge sur la figure 3.21). Le maximum de la vitesse dans ce cas est de 47,5 m/min soit 79 cm/s, bien au-dessus des valeurs relevées par Béthoux *et al.*, 1988.

Etude de la dérive en profondeur des flotteurs

Pour des raisons pratiques, nous corrigeons la dérive en profondeur du flotteur, c'est à dire le temps de propagation de l'onde P dans l'eau, en utilisant la bathymétrie. Les flotteurs dérivant dans la colonne d'eau à une immersion moyenne de 1514 m, il faut corriger le temps de propagation de l'onde, après sa conversion en onde acoustique à l'interface eau-plancher océanique, jusqu'au flotteur. La mesure de l'immersion est réalisée par le capteur de pression placé sur la tête du flotteur.

Pour effectuer cette correction, nous avons utilisé les données de la synthèse bathymétrique à haute résolution (résolution horizontale de 25 m) des campagnes MALISAR (Migeon *et al.*, 2011, Migeon et Larroque, 2008, Migeon et Larroque, 2007, Migeon et Larroque, 2006) présentée en figures 3.22 et 3.23. Sous chaque coordonnée d'un flotteur au moment de l'enregistrement d'un séisme, nous avons extrait la bathymétrie, afin de corriger le temps de propagation de l'onde P dans l'eau.

Les figures 3.20, 3.22 et 3.23 représentent la synthèse des données bathymétriques que nous avons utilisée (Migeon *et al.*, 2011, Migeon et Larroque, 2008, Migeon et Larroque, 2007 et Migeon et Larroque, 2006). Deux positions se trouvaient au-delà de la zone cartographiée, le flotteur M30, situé au sud-ouest de la carte (figure 3.22) et le M33, situé au sud-est de la carte 3.22. Dans les deux cas, la précision écheante est de 100 m. La topographie du fond marin étant toutefois peu

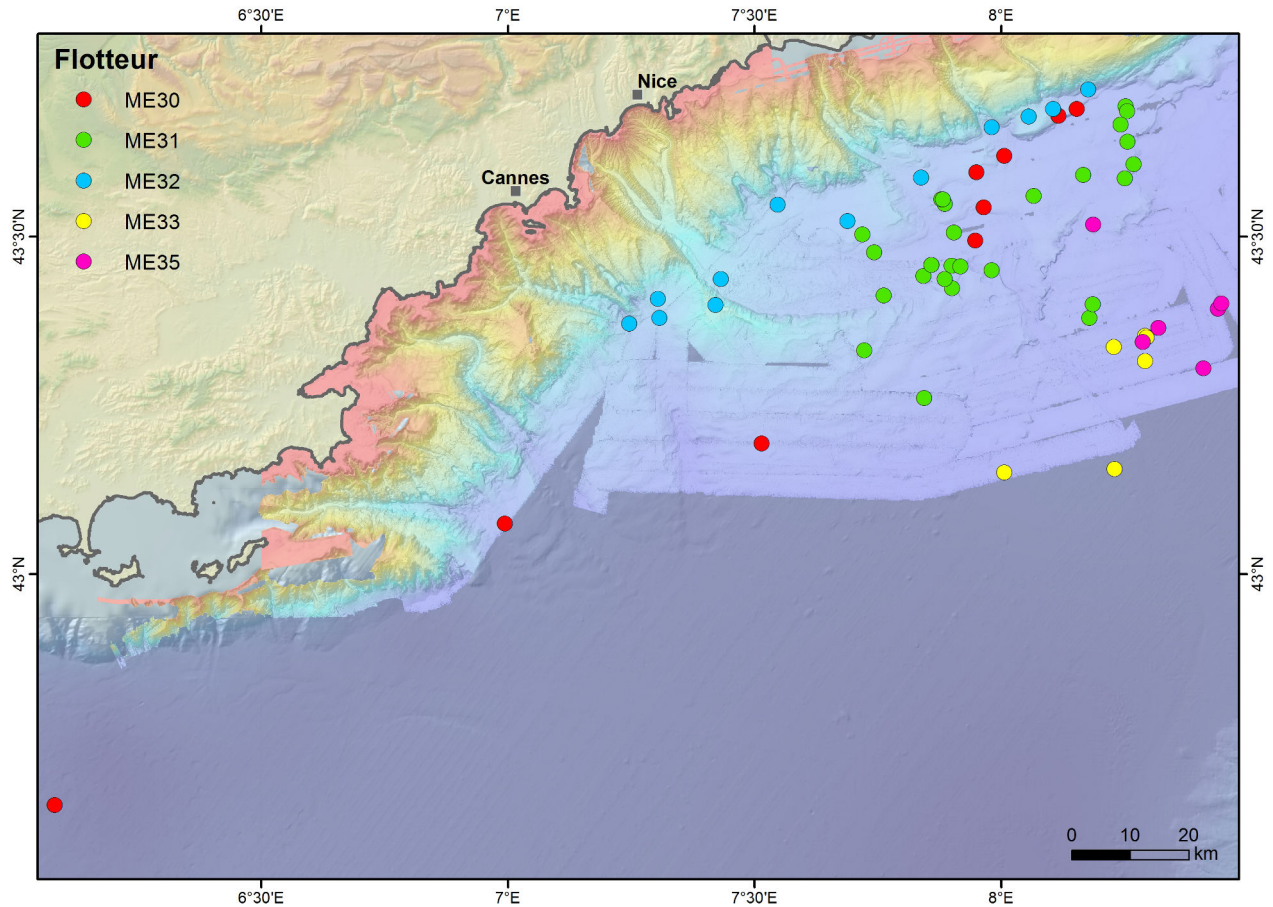


FIGURE 3.22 – Positions des flotteurs MERMAID lors de l’acquisition d’un séisme (avec sous sans remontée automatique), superposées à la synthèse bathymétrique du bassin Ligure à 25 m, synthèse des campagnes multi-faisceaux sur la marge nord du bassin Ligure, dont MALISAR (Migeon *et al.*, 2011, Migeon et Larroque, 2008, Migeon et Larroque, 2007 et Migeon et Larroque, 2006), et aux données IBCM, résolues à 100 m. D’après J. Trévisan.

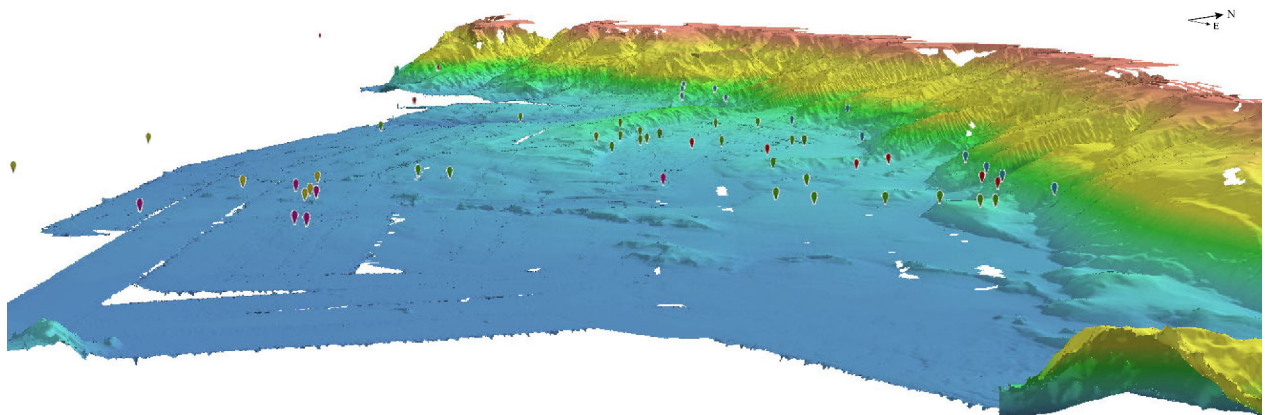


FIGURE 3.23 – Carte bathymétrique et positions des flotteurs en trois dimensions lors de l’enregistrement d’un séisme, d’après une synthèse 2011 des campagnes multi-faisceaux sur la marge nord du bassin Ligure, dont MALISAR (Migeon *et al.*, 2011, Migeon et Larroque, 2008, Migeon et Larroque, 2007 et Migeon et Larroque, 2006). L’angle de vue se situe depuis le Golfe de Gène vers la ride du Var. D’après J. Trévisan.

accidentée - à l'exception de la ride du Var, l'estimation de la bathymétrie pour ces deux points est acceptable.

En considérant une propagation de l'onde verticale dans l'eau, la correction du temps de parcours additionnel entre le fond marin et le flotteur (t_{eau}) est définie par l'équation 3.1 :

$$t_{eau} = \frac{P_{sol} - P_{MERMAID}}{c} \quad (3.1)$$

Avec P_{sol} la bathymétrie (m) du fond marin aux coordonnées du flotteur lors de l'acquisition d'un événement, $P_{MERMAID}$ l'immersion du flotteur (m) et c la vitesse de propagation de l'onde acoustique dans l'eau, soit 1522 m/s (équation 3.2). La vitesse de propagation du son dans l'eau a été calculée à partir des données de salinité et de température du flotteur italien ARGO n°6901836 déployé dans le bassin Ligure (profil du 19 juillet 2015). A une profondeur de $z = 1500$ m, nous obtenons une salinité de $S = 33,6$ g/kg et une température $T = 13^\circ\text{C}$. A partir de l'équation d'état de l'eau de mer, nous obtenons :

$$c = 1449,2 + 4,6 T - 0,055 T^2 + 0,00029 T^2 + (1,34 - 0,010 T) (S - 35) + 0,016 z = 1522 \text{ m/s} \quad (3.2)$$

Nous avons considéré l'arrivée de l'onde P comme purement verticale, en négligeant par conséquent un angle d'incidence éventuel. En moyenne, les flotteurs étaient immergés à 885 m du fond, soit un temps de trajet $t_{eau} = 0,58$ s entre le fond et le flotteur. Pour une arrivée présentant un angle d'incidence de 20° , on obtient une distance plancher-flotteur de 942 m ($d = 885 / \cos(20^\circ)$), soit une distance supplémentaire de 57 m et un temps supplémentaire de 0,04 s. Cette différence étant au-dessous de la barre d'erreur que nous nous sommes fixés sur la lecture des phases des données (tableau 3.8), nous la considérons comme acceptable.

Types de corrections	Seuil toléré
Dérive d'horloge	$< 0,1$ s
Immersion	$\leq 0,1$ s
Remontée non-automatique	$\leq 0,3$ s

TABLEAU 3.8 – Seuils tolérés pour les étapes de pré-traitement des données des flotteurs MERMAID.

La qualité des cartes bathymétriques couplée au fait que le bassin Ligure est relativement plat dans sa partie distale, nous permettent d'avoir confiance dans les corrections d'immersions. Pour de futurs déploiements, la bathymétrie des fonds marins et la résolution horizontale des cartes seront à considérer. En effet, pour des cartes bathymétriques globales des océans, telles que proposées par Becker *et al.*, 2009, Smith et Sandwell, 1997, si l'on s'intéresse à des régions peu étudiées, la résolution horizontale est faible et correspond à une valeur de la bathymétrie tous les 1 à 12 km.

Dans le cadre de l'évolution du flotteur MERMAID vers Multi-MERMAID, il est également envisagé d'utiliser un émetteur (« pinger ») placé au-dessous du flotteur, qui permettra de mesurer avec plus de précision la distance flotteur - fond marin.

iii. Etude des séismes sans remontée automatique

Présentation des données sans remontée automatique

Sur les six mois d'acquisitions réalisés par trois flotteurs MERMAID, 68 % des signaux acquis ont engendré une remontée automatique (tableau 3.9). Les signaux n'ayant pas entraîné de remontée automatique sont transmis à la prochaine remontée.

Flotteurs	Nombre d'évènements	Remontées automatiques	Sans remontée automatique	% de remontées automatiques
M30	9	5	4	56 %
M31	27	19	8	70 %
M32	12	6	6	50 %
M33	6	6	0	100 %
M35	6	5	1	83 %
Total	60	41	19	68 %

TABLEAU 3.9 – Tableau représentant les nombres de séismes ayant engendré ou non des remontées automatiques (M : MERMAID).

Les évènements n'ayant pas généré de remontées automatiques sont cohérents entre flotteurs. Si un événement n'a pas engendré de remontée, dans 89 % des cas les trois flotteurs présents, s'ils ont enregistré le séisme, ne sont également pas remontés en surface. Seul un événement a engendré la remontée automatique de deux flotteurs sur les trois ayant enregistré le séisme. Il s'agit d'un séisme régional en provenance du sud de la Grèce ayant eu lieu le 29 août 2014 ($M_w = 5,8$). Les enregistrements associés sont illustrés en figure 3.24. Dans cet exemple, le flotteur M35 n'a pas généré de remontée automatique. Le sismogramme montre une amplitude de l'axe des ordonnées moins importante (10^5) que celle des flotteurs M31 et M33 (10^6), qui pourrait être la cause de la non remontée automatique. Une seconde possibilité peut être un rapport signal à bruit trop faible pour entraîner la remontée du flotteur.

Traitement des données sans remontée automatique

La localisation géographique des flotteurs, dans le cadre de ces séismes, est déterminée par interpolation linéaire entre le dernier point GPS du flotteur avant la descente et le premier point

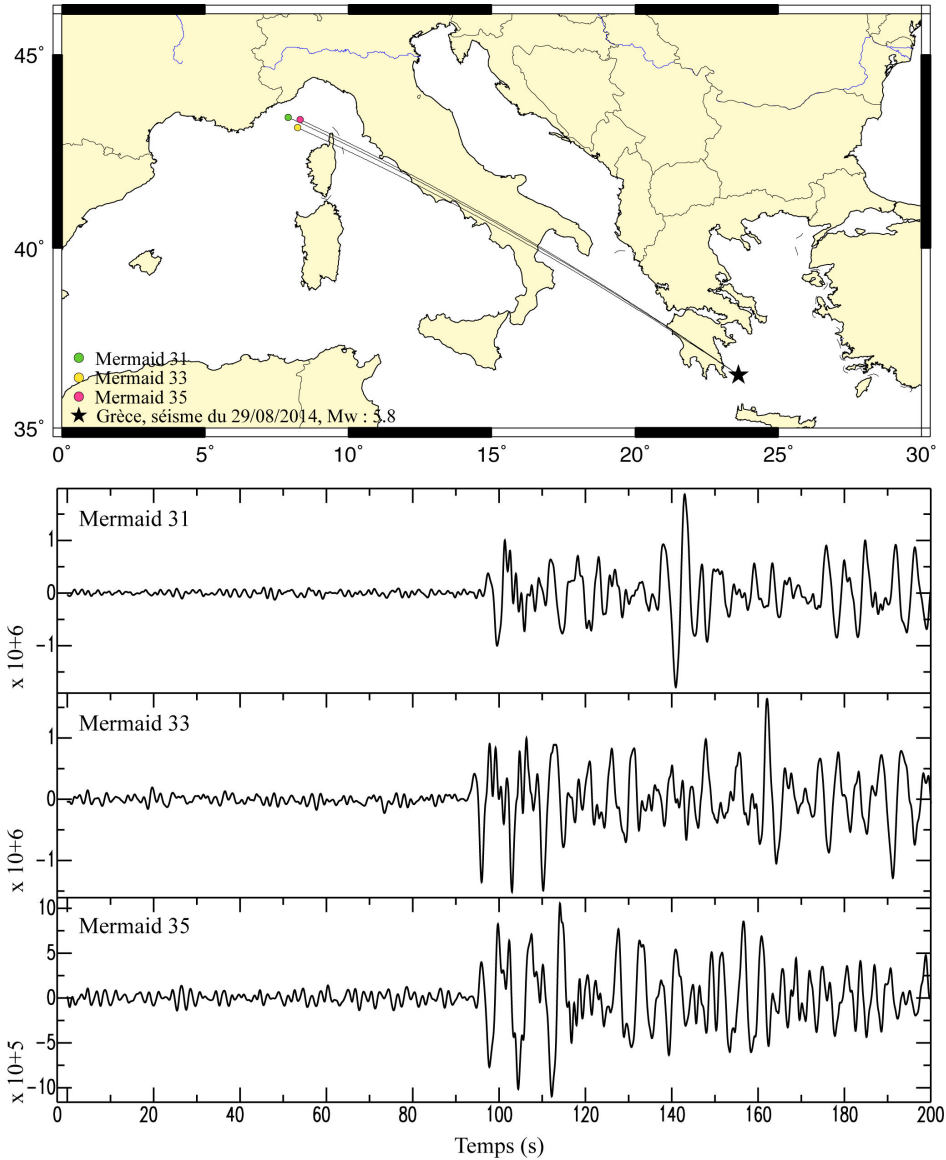


FIGURE 3.24 – Sismogrammes du séisme local du 29 août 2014, en provenance du sud de la Grèce ($M_w = 5,8$).

GPS à la remontée (traits pleins en figures 3.20 et 3.25). Afin de vérifier que cette interpolation est une approche correcte, nous avons étudié la trajectoire des flotteurs en profondeur à partir d’une interpolation de Bézier (Bézier, 1987 et Bézier, 1977).

Notre étude suit quatre étapes :

- Nous partons du constat que les remontées des flotteurs en surface ont modifié les trajectoires des flotteurs s’ils n’étaient pas remontés. Les trajectoires «points à points» sont illustrées en traits pleins sur la figure 3.25. Afin de reproduire les trajectoires en profondeur, nous

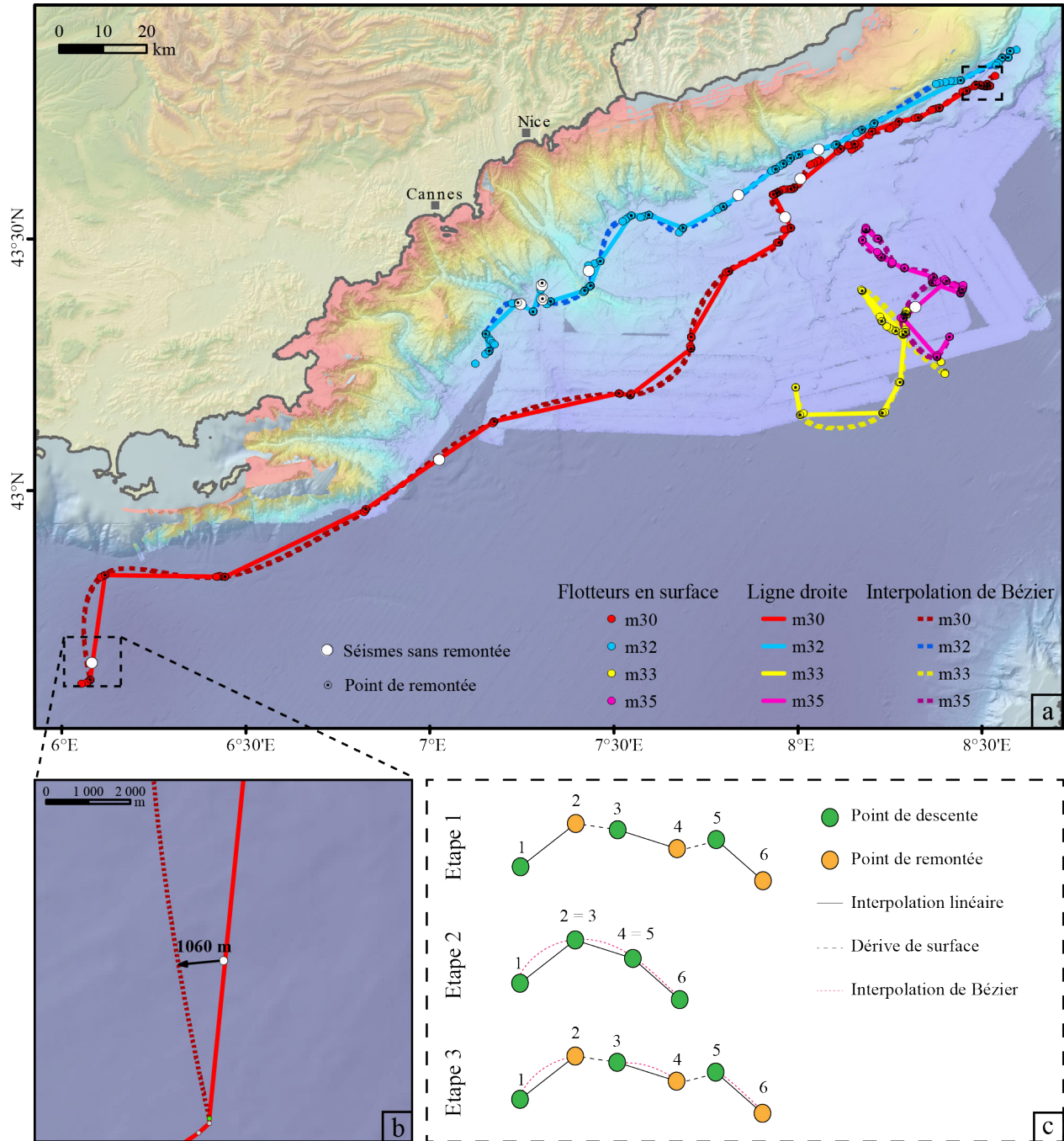
isolons les tronçons des trajectoires des flotteurs entre chaque descente (points en vert sur la figure 3.25.c) et chaque remontée (points en orange sur la figure 3.25.c). Nous faisons ensuite correspondre le point de remontée du flotteur avec le point de sa prochaine descente. De cette façon, nous obtenons une correspondance entre les points : $2=3$, $4=5$, ...

- A partir de la juxtaposition de ces tronçons, nous réalisons une interpolation de Bézier (Bézier, 1987 et Bézier, 1977), correspondant à la courbe en pointillés fushia sur la figure 3.25.c et aux courbes en pointillés sur les figures 3.25.a et 3.25.b.
- Lors de l'enregistrement d'un séisme sans remontée automatique, nous utilisons la courbe de Bézier précédemment réalisée, que nous remplaçons sur le tronçon équivalent à la trajectoire observée du flotteur (pointillés fushia sur la figure 3.25.c, étape 3).
- Nous mesurons ensuite l'écart entre la courbe de Bézier (courbes en pointillés sur les figures 3.25.a et 3.25.b) et l'interpolation linéaire actuellement réalisée (courbes en traits pleins sur les figures 3.25). Nous obtenons une répartition des écarts suivants :
 - De 0 à 500 m d'écart : 67 %
 - De 500 à 1000 m d'écart : 0 %
 - De 1000 à 1500 m d'écart : 11 %
 - De 1500 à 2000 m d'écart : 11 %
 - < 2100 m : 11 %

Les flotteurs M30, M32 et M35 ont été concernés par cette étude. La répartition des distances entre les trajectoires de Bézier et linéaire nous donne confiance en l'estimation de la localisation géographique du flotteur lors d'un évènement sans remontée automatique. Un écart de 2090 m (le maximum observé), représente un écart de temps inférieur aux erreurs tolérées (que nous avons fixé à $\Delta t = 0,3$ s, tableau 3.8). En effet, dans le cas par exemple d'une onde P_n parcourant 2090 m supplémentaires (Δd), en considérant une vitesse de l'onde V_{P_n} de 8,1 km/s, l'erreur de temps de trajet est de 0,26 s :

$$\Delta t = \frac{\Delta d}{V_{P_n}} = \frac{2090}{8100} = 0,26 \text{ s} \quad (3.3)$$

Cette étude nous a permis de valider l'approximation d'une interpolation linéaire de la position des flotteurs en profondeur lors de séismes n'ayant pas entraîné de remontée automatique qui est actuellement utilisée en première approximation. Cela nous permet d'incorporer ces cas spécifiques à notre jeu de données.



b. Présentation des données pour l'inversion

Après avoir réalisé les corrections énoncées précédemment, les lectures de la phase P ont été réalisées suivant la même méthodologie que pour les jeux de données précédents. La couverture finale obtenue est illustrée en figure 3.26.

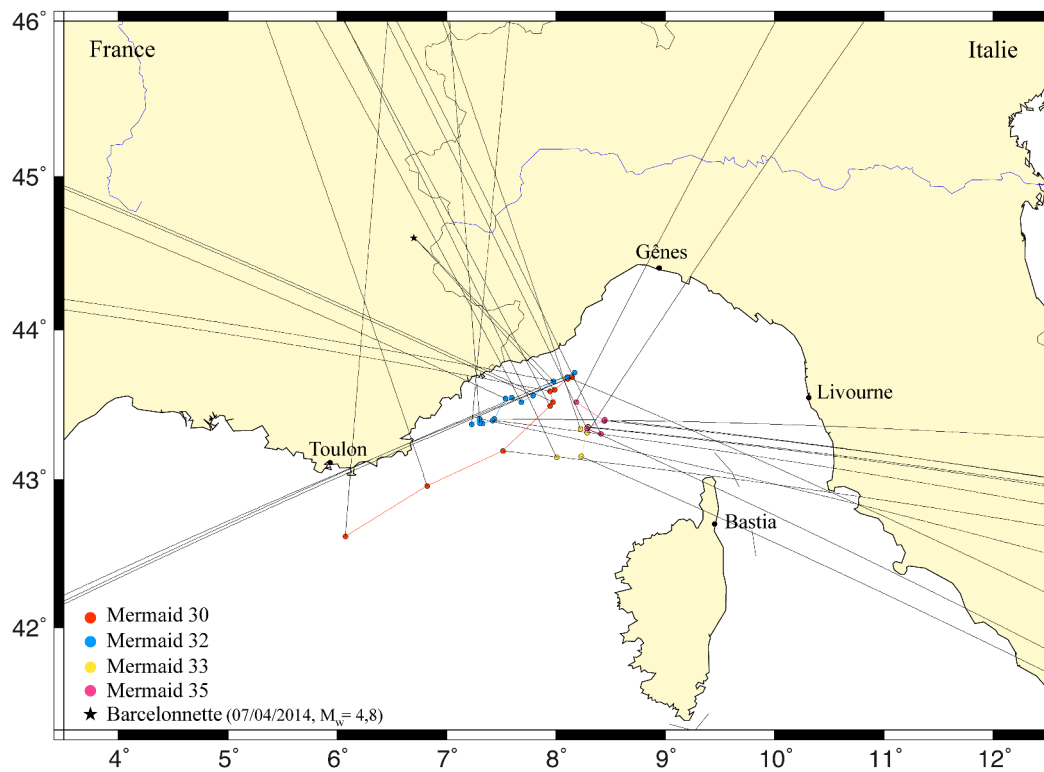


FIGURE 3.26 – Carte de couverture des séismes sélectionnés et enregistrés par les flotteurs MERMAID.

III. Inversion tomographique

Dans cette partie, nous présentons brièvement la procédure de l'inversion tomographique utilisée.

La tomographie sismique s'utilise à différentes échelles en fonction des tailles des anomalies à imager.

Trois types de tomographies sont à distinguer :

- La tomographie *locale* permet d'imager des structures de petites dimensions, de l'ordre du kilomètre, à l'échelle de la croûte, par exemple pour le suivi d'activité volcanique.
- La tomographie *régionale* permet elle, d'imager des structures de la croûte et du manteau supérieur, comme des zones de subduction ou chaînes de montagnes, avec une résolution de l'ordre de la dizaine de kilomètres.
- La tomographie *globale* permet d'apporter des images allant jusqu'au noyau externe de la Terre, avec une résolution de quelques centaines de kilomètres.

Nous allons réaliser ici une étude régionale du bassin Ligure en utilisant un code d'inversion tomographique initialement développé pour une application à échelle globale (Nolet, 2008).

1. Principe de l'inversion tomographique

La tomographie sismique permet d'obtenir une image de l'intérieur de la Terre en termes de variations de vitesse des ondes qui la traversent, dites «anomalies de vitesse», permettant de mettre en avant les zones de plus faibles et fortes vitesses en comparaison à un modèle de référence. Pour notre application, ce modèle d'anomalies nous permet de valider la cohérence des données des flotteurs MERMAID avec une étude des résidus des temps d'arrivées des ondes.

Afin de réaliser une image tomographique, il est nécessaire de résoudre un problème inverse. Ce problème se formule par un système linéaire dans lequel, à partir de données observées et d'un modèle de référence des vitesses de propagation des ondes dans la Terre, nous essayons de trouver la meilleure solution permettant de satisfaire le système d'équations.

Nous utilisons la théorie des rais et étudions les temps des premières arrivées des ondes P .

D'après la théorie des rais, le temps de trajet d'une onde depuis la source d'un séisme (s) jusqu'aux stations d'un réseau (r) s'exprime suivant l'équation :

$$T_{sr} = \int_s^r \frac{dS}{V} \quad (3.4)$$

Avec T_{sr} le temps de trajet du rai, dS un élément de la longueur du rai et V la vitesse de l'onde

sur la portion dS de rai considérée.

Dans la résolution du problème inverse, on s'intéresse aux résidus des temps des trajets d'une onde par rapport à un modèle de référence à une dimension, dans notre cas IASP91⁸ (Kennett et Engdahl, 1991), sur l'ensemble des stations du réseau (figure 3.5). Le résidu de temps de trajet (δt) se définit par l'équation :

$$\delta t = T^{obs} - T^{mod} = \int_s^r \frac{dS}{V} - \int_{s_0}^{r_0} \frac{dS}{V_0} \quad (3.5)$$

Avec T^{obs} le temps de trajet observé à une station, T^{mod} le temps de trajet calculé à partir du modèle à une dimension de référence et V_0 la vitesse de l'onde dans le modèle.

Si le résidu obtenu est positif, alors le rai a mis un temps plus important pour arriver à la station que celui estimé à partir du modèle. Au contraire, si le résidu est négatif, l'onde est arrivée plus rapidement que prévu.

Ce problème inverse est non-linéaire dans la mesure où le chemin emprunté par le rai dépend de la vitesse du milieu, qui est elle-même inconnue. En considérant que la trajectoire empruntée par le rai dans la Terre n'est pas significativement différente de celle empruntée dans le modèle de référence, la formulation matricielle du problème inverse peut néanmoins s'exprimer linéairement sous la forme de l'équation :

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{m} = \mathbf{d} \quad (3.6)$$

Avec \mathbf{A} la matrice de paramétrisation, \mathbf{m} le vecteur du modèle et \mathbf{d} le vecteur des données.

La résolution de ce problème étant instable, elle nécessite une régularisation, effectuée suivant l'équation :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \alpha D \\ \beta S \end{bmatrix} \cdot \mathbf{m} = \begin{bmatrix} \mathbf{d} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Avec α et β les poids respectifs de l'amortissement D («damping») et de lissage S («smoothing»).

La résolution de ce système est réalisée par la méthode des moindres carrés LSQR⁹ (Paige et Saunders, 1982) qui a déjà démontré son efficacité par le passé (Nolet, 1985 et Spakman et Nolet, 1988).

8. International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior

9. Least **S**Qua**R**es

Cette méthode revient à trouver la solution minimisant la fonction coût C définie par l'équation :

$$C(\mathbf{m}) = \|\mathbf{d} - \mathbf{A}\mathbf{m}\| + \alpha^2 \|\mathbf{m}\|^2 + \beta^2 \|\Delta\mathbf{m}\|^2 \quad (3.8)$$

2. Les étapes de l'inversion tomographique

L'inversion tomographique est divisée en étapes illustrées en figure 3.27. Les programmes et le manuel d'utilisation sont disponibles à l'adresse : <https://www.geoazur.fr/GLOBALSEIS/Soft.html>. Une explication détaillée des différentes étapes est disponible en annexe E.

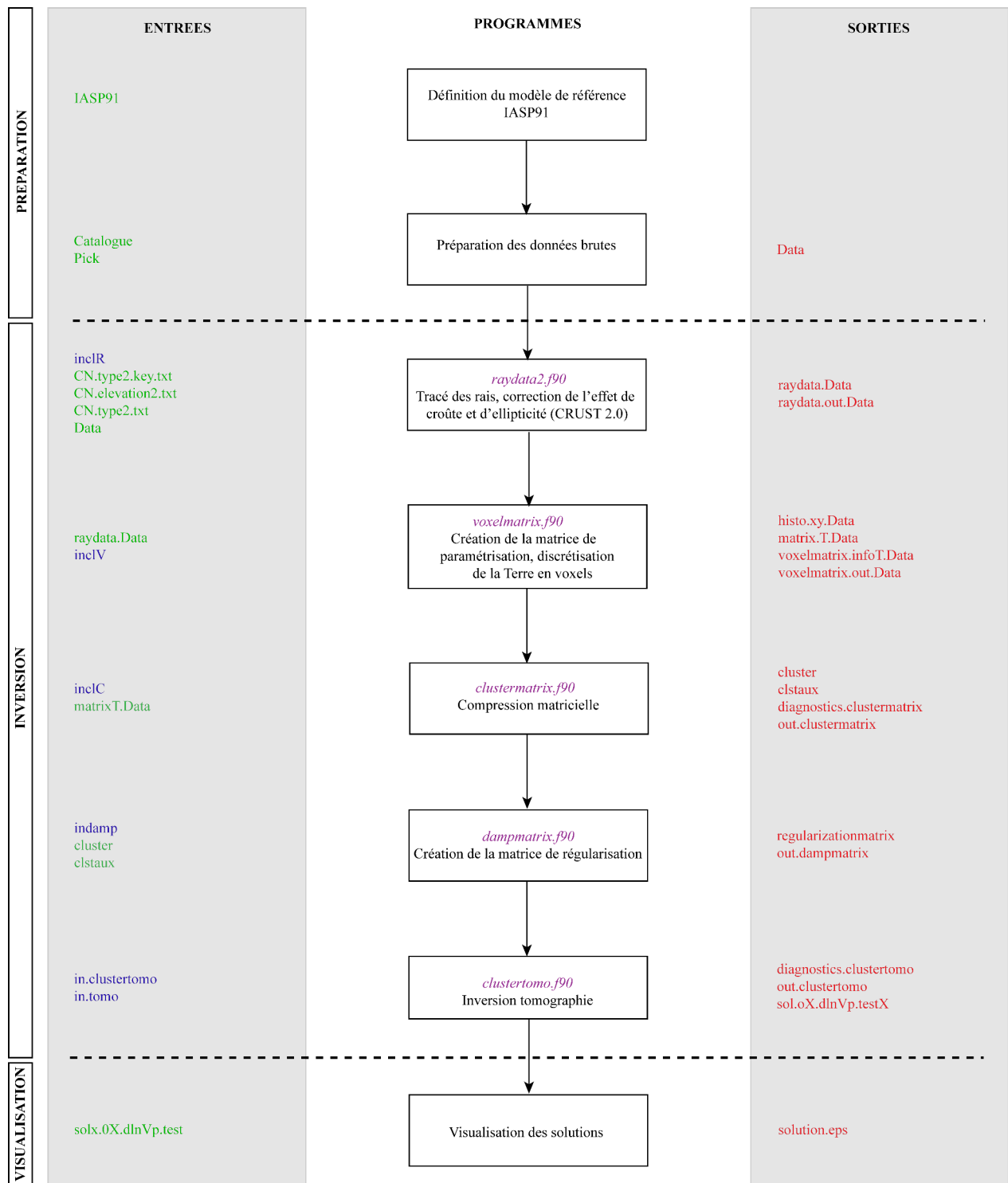


FIGURE 3.27 – Schéma des étapes de l'inversion tomographique. Les fichiers d'entrées sont en vert et les fichiers de paramètres sont en bleu. Les fichiers de sorties «.out» et «.info» sont des fichiers systèmes, qui permettent de suivre le déroulement des différentes étapes.

IV. Résultats

Nous allons désormais nous intéresser à la validation des données MERMAID. Pour cela, nous les avons intégrées dans une inversion tomographique. Bien que ce jeu de données soit restreint ($\approx 3\%$), notre objectif est de voir comment les résidus des temps des trajets observés par les MERMAID satisfont à l'inversion et correspondent aux autres données des stations terrestres et OBS.

Au cours de cette étude, nous avons eu l'opportunité de réaliser une étude paramétrique afin d'étudier l'influence de différents paramètres sur les solutions obtenues. Nous avons réalisé ces tests afin de tirer le jeu de paramètres optimal montrant la meilleure résolution aux tests en damier.

1. Étude paramétrique

Nous avons tiré profit de la taille relativement restreinte de notre base de données, permettant une résolution relativement rapide, pour étudier l'influence de certains paramètres sur nos solutions. Notamment le rapport des paramètres d'amortissement et de lissage.

Le programme de tomographie a été adapté à notre échelle d'application, il est possible de définir une zone en-dehors de laquelle un amortissement différent peut être appliqué aux données. Cela permet de prendre en compte les anomalies de vitesse rencontrées par les rais en-dehors de la zone d'étude et donc de considérer le trajet du rai dans son entier. Notons que les études de tomographie locale considèrent que les anomalies des vitesses observées sont uniquement liées aux structures dans la zone considérée. Dans notre cas, la zone d'étude (figure 3.28) se définit comme une demi-sphère centrée sur une latitude et longitude choisies et de rayon variable. Au-delà de cette zone, l'amortissement peut être augmenté, ce qui permet de prendre en compte l'influence de la guérison du front d'onde («wavefront healing»). Nous avons testé l'influence du rayon de la demi-sphère définissant la zone étudiée et différentes valeurs d'amortissement des données en-dehors de celle-ci.



FIGURE 3.28 – Schéma de la demi-sphère définissant notre zone d'étude.

a. Etude de l'amortissement en dehors de la zone d'étude

Afin d'étudier l'influence des données en-dehors de la demi-sphère d'étude, de qualitativement prendre en compte la guérison du front d'onde («wavefront healing»), nous avons testé plusieurs valeurs de cet amortissement (γ), de 1 à 20 à partir de nos données. Plus l'amortissement est petit et plus on se trouve dans le cas d'une tomographie globale ($\gamma = 1$), c'est-à-dire que la zone définie dans la demi-sphère et au-dehors de celle-ci (figure 3.28) ont un poids équivalent. Au contraire, plus la valeur de l'amortissement est importante et plus nous sommes dans le cas d'une tomographie locale ($\gamma = 20$), où le poids de la zone est davantage pris en considération.

Les résultats obtenus sont présentés en figure 3.29. Entre les figures 3.29.a ($\gamma = 1$) et 3.29.e ($\gamma = 20$), nous observons un renforcement des amplitudes. Nous notons que cette augmentation devient asymptotique à partir de $\gamma = 10$ (figures 3.29.c, 3.29.d et 3.29.e).

Il est clair qu'un amortissement de 1 entraîne une atténuation importante des anomalies de vitesse (figure 3.29.a). En revanche pour des valeurs de 5 et 10 (figure 3.29.b et 3.29.c), la différence de l'influence du paramètre est moins visible. Pour la suite des études, nous avons sélectionné un amortissement de 10 car cette valeur nous permet d'obtenir des amplitudes des anomalies observées, proches de celles observées par des précédents travaux disponibles dans la littérature. Nous discuterons nos résultats avec les travaux de Piromallo et Morelli, 2003 et Spakman et Wortel, 2004 en IV.3 de ce chapitre.

b. Etude de l'influence du rayon de la zone d'étude

Nous avons dans un deuxième temps étudié l'influence du rayon de la demi-sphère de notre zone (figure 3.28) pour les valeurs de 500 et 600 km (figure 3.30). Nous observons que ce paramètre joue un rôle mineur dans la solution, les différences entre les solutions à 500 (figure 3.30.a) et 600 km (figure 3.30.b) sont faibles. Dans la suite de nos tests, nous considérons un rayon de 600 km.

c. Etude de l'influence des paramètres d'amortissement et de lissage

Le choix des paramètres d'amortissement et de lissage dans la demi-sphère d'étude est un choix subjectif de l'utilisateur. Nous avons testé ici cinq combinaisons d'amortissement et de lissage dans la demi-sphère d'étude : 0,1/0,9, 0,2/0,8, 0,3/0,7, 0,4/0,5 et 0,5/0,5 (figure 3.31).

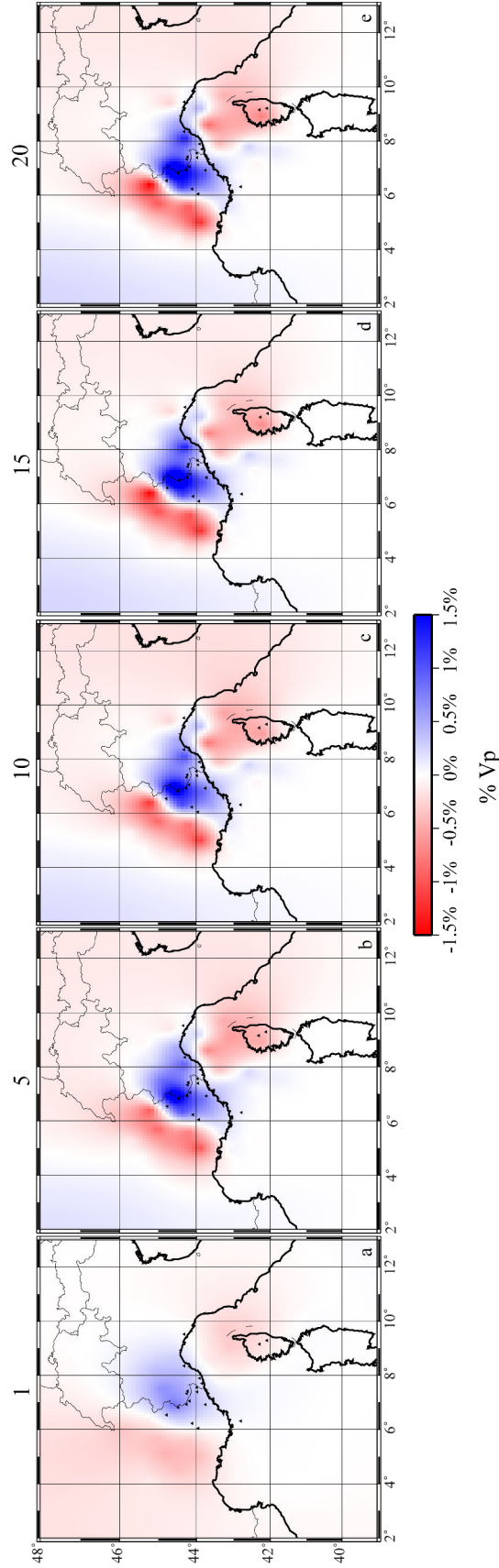


FIGURE 3.29 – Etude de l'influence de l'amortissement des données en-dehors de la demi-sphère d'étude sur les solutions de l'inversion. Ici, nous considérons la solution obtenue à 135 km de profondeur pour les valeurs d'amortissement en-dehors de la demi-sphère d'étude de 1, 5, 10, 15 et 20. La demi-sphère définissant la zone d'étude est centrée sur le point 43°N 7°E et de rayon 600 km. Le rapport de l'amortissement et du lissage dans la demi-sphère est de 0,2/0,8. L'échelle de couleur est linéaire à $\pm 1,5\%$. Les images tomographiques sont issues des données des temps des arrivées des ondes P dans le cas des stations terrestres uniquement.

Nous dégageons deux tendances dans les solutions obtenues (figure 3.31). Une première tendance à l'augmentation des amplitudes des anomalies (figures 3.31.a à 3.31.c), qui représentent les ratios susceptibles d'être utilisés soient de 0,1/0,9 à 0,3/0,7 (valeurs similaires utilisées dans la littérature). Ces augmentations restent relativement faibles avec un minimum de -0,3 % et un maximum de +0,1 %. Au-delà du ratio 0,3/0,7 (figures 3.31.d et 3.31.e), valeurs non utilisées dans la littérature, nous observons une tendance inverse. Par rapport à la figure 3.31.c, le minimum de l'anomalie négative diminue de 0,1 % et le maximum de l'anomalie positive de 0,08 %.

Dans la suite des inversions, nous avons utilisé le ratio 0,3/0,7 car il permet une meilleure reconstitution des damiers lors des tests de résolution que nous aborderons dans la partie suivante. Le jeu final des paramètres comprend un amortissement en-dehors de la zone d'étude de 10, les valeurs d'amortissement - lissage de la demi-sphère de 0,3/0,7 et un rayon de 600 km.

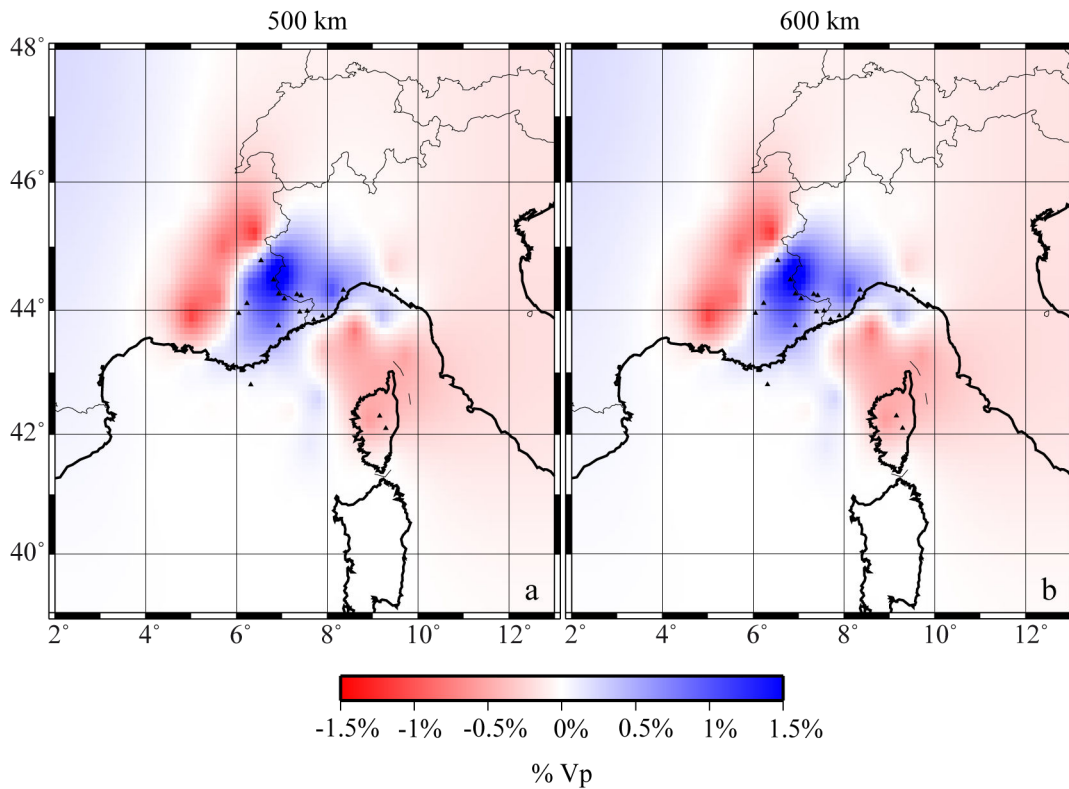


FIGURE 3.30 – Etude de l'influence du rayon de la demi-sphère de la zone d'étude sur les solutions pour un rayon de 500 (a) et 600 km (b). Ici, nous considérons la solution obtenue à partir des données des stations terrestres à 135 km de profondeur avec un amortissement en dehors de la zone d'étude de 10. La demi-sphère définissant la zone d'étude est centrée sur le point 43°N 7°E. Le rapport de l'amortissement et du lissage dans la demi-sphère est de 0,2/0,8. L'échelle de couleur est linéaire à $\pm 1,5$ %.

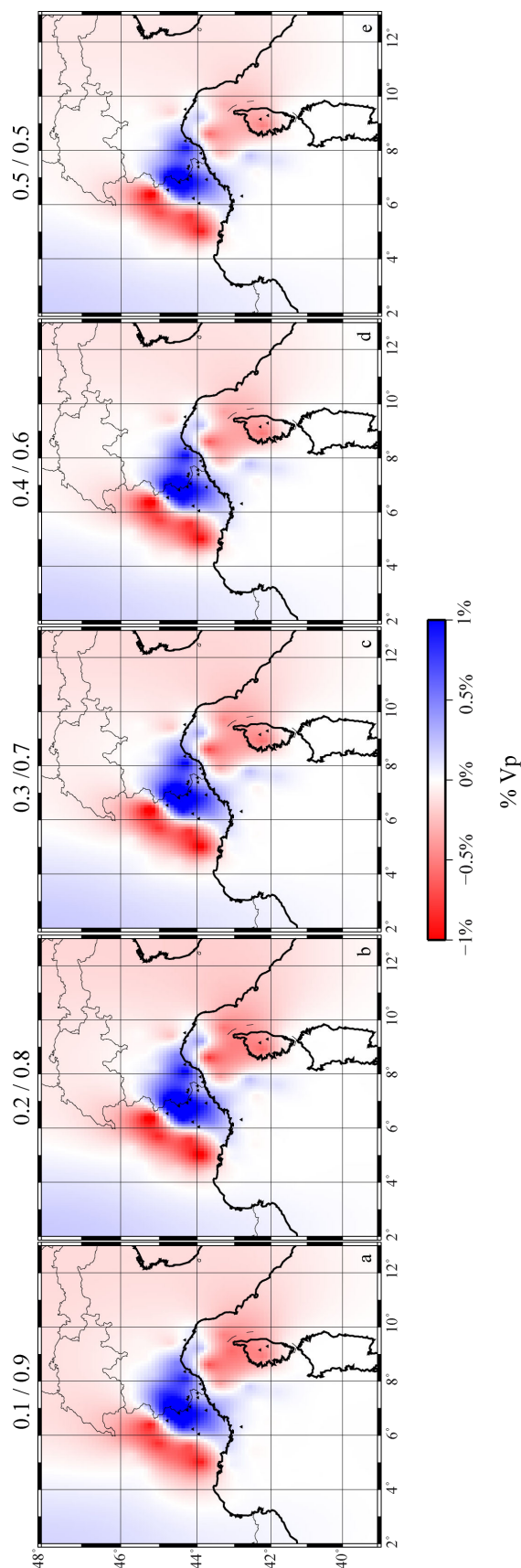


FIGURE 3.31 – Etude des paramètres d’amortissement et de lissage dans la demi-sphère sur la solution, pour les ratios 0,1/0,9, 0,2/0,8, 0,3/0,7, 0,4/0,6 et 0,5/0,5. Ici, nous considérons la solution obtenue à partir des données des stations terrestres à 135 km de profondeur pour un amortissement en-dehors de la zone d’étude de 10. Le rayon de la demi-sphère définissant la zone d’étude est de 600 km, centrée sur le point 43°N 7°E. L’échelle de couleur est linéaire à $\pm 1,0\%$.

2. Tests de résolution

Une fois le jeu de paramètres défini, nous avons effectué des tests de résolution pour savoir quelles zones étaient résolues et quel était l'apport de l'incorporation des données marines (OBS et MERMAID) sur la résolution de l'image. Pour cela, nous avons effectué deux types de tests de résolution : des tests en damier avec des voxels de différentes tailles («checkerboard») et des tests en sphère gaussienne à différentes profondeurs.

a. Tests de résolution en damier

Afin d'étudier l'étendue de la zone résolue, nous avons raisonné en termes d'amélioration de la reconstitution des damiers au test de résolution. Nous avons effectué des tests avec différentes tailles de maillage du damier, soit 1×1 voxel, 2×2 voxels et 3×3 voxels (78×78 km, 156×156 km et 234×234 km, [Simons et al., 2011](#)). Nous avons également testé trois jeux de données différents : (1) les données des stations terrestres, (2) les données des stations terrestres et de la campagne GROSMarin, (3) les deux jeux précédents et les données des flotteurs MERMAID. Ces jeux de données sont de tailles différentes, les données des stations terrestres en représentent 84 %, les données de la campagne GROSMarin 13 % et les données des flotteurs MERMAID 3 %.

Taille du damier

Les résultats des tests pour différentes tailles de damier sont illustrés en figure 3.32. Sur les tests de résolution à 226 km de profondeur, nous constatons une meilleure reconstitution du damier dans le cas 2×2 voxels. Dans le cas 1×1 voxel, la taille des anomalies de vitesse est trop petite pour être reconstituée. Dans le cas 3×3 voxels, seuls deux carrés du damier sont reconstitués, ainsi que la limite entre ces deux voxels, cette fois-ci la taille des anomalies est trop grande pour être reconstituée.

Le choix d'un damier 2×2 voxels présente le meilleur compromis et montre une meilleure reconstitution du damier. Cette taille de damier n'est pas trop grande pour représenter les données, de cette façon nous limitons les erreurs de la modélisation. Si nous observons des résidus de temps de trajet important après inversion, cela indiquera des erreurs dans les temps pointés (partie 3). Nous observons que les formes de sept cellules du damier sont reconstituées. Les amplitudes des anomalies incorporées (± 5 %) ne sont pas bien reconstituées (moins de 25 %). Le meilleur résultat est obtenu dans le nord de la zone d'étude, sous les deux cellules négatives et la cellule positive situées entre les latitudes 43°N à 46°N et longitudes de 4°E à 10°E . Au-dessous de cette zone, les cellules du damier sont partiellement reproduites en termes de forme, notamment la cellule entre 43°N et 44°N de latitude et 6°E à 7°E de longitude. La cellule située au niveau de la Corse est partiellement re-

produite, principalement deux de ses limites nord-ouest et sud-est. Deux cellules au sud de la zone, entre 41°N et 43°N de latitude et 4°E et 8°E sont également partiellement reproduites en termes de forme. La cellule entre 42°N et 43°N de latitude et 4°E et 6°E reproduit principalement sa frontière nord-est et faiblement la frontière nord-ouest et entre 41°N et 43°N de latitude et 6°E et 8°E, seules les frontières nord-ouest et nord-est de cette cellule sont reproduites.

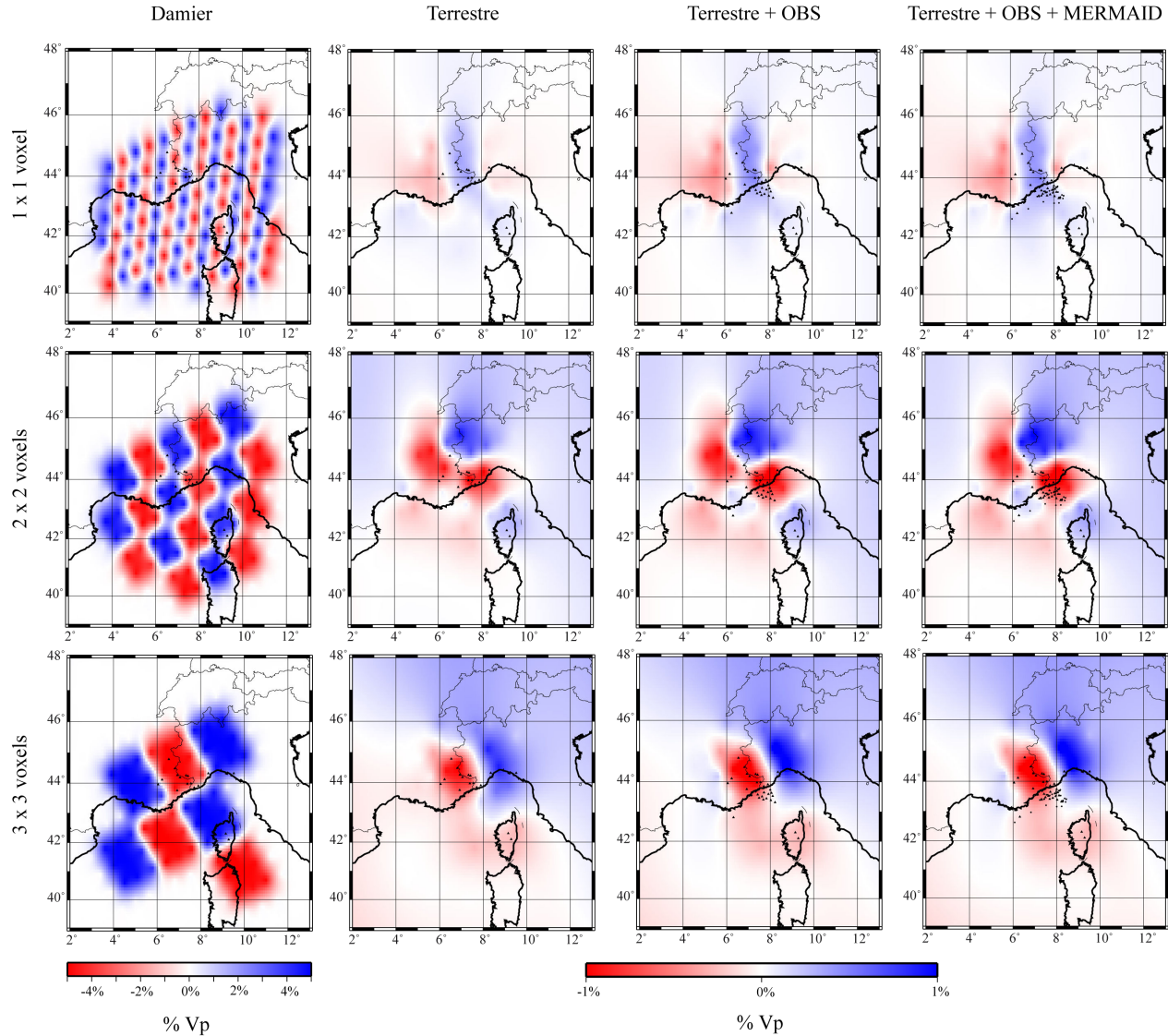


FIGURE 3.32 – Résultats des tests de résolution en damier pour différentes tailles de damier : 1×1 voxel (78×78 km, première ligne), 2×2 voxels (156×156 km, deuxième ligne) et 3×3 voxels (234×234 km, troisième ligne) à 226 km de profondeur. La première colonne représente les différentes tailles des damiers. Les colonnes deux, trois et quatre représentent les solutions des tests de résolution pour les trois types de jeux de données considérés. Soit (1) les données des stations permanentes terrestres, (2) les données précédentes associées aux données des OBS de la campagne GROSMarin et (3) les données précédentes ainsi que les données des flotteurs MERMAID.

Comparaison des jeux de données

Concentrons-nous désormais sur les résultats des tests de résolution à 2×2 voxels (figures 3.32 et 3.33, la figure 3.33 reprend les résultats de la figure 3.32 et y ajoutant des pointillés séparant les voxels), nous constatons une amélioration de la résolution du damier entre les jeux de données (1) et (2) (figures 3.33 et 3.34.a), puis entre (1) et (3) (figures 3.33 et 3.34.b). L'incorporation des données des stations OBS et MERMAID apporte un petit gain de résolution. Cette amélioration, quoique faible, reste notable au niveau de l'anomalie positive située entre 43°N et 44°N de latitude et 6°E et 7°E de longitude. Cette dernière est quasiment inexistante dans le cas des données des stations terrestres seules (1, figure 3.33.b), son amplitude et sa forme se renforcent dans les cas (2) et (3) (figures 3.33.c et 3.33.d).

Une observation similaire est faite sur les solutions (figures 3.34.c et 3.34.d). Cette amélioration est relativement faible, cependant notable compte tenu du pourcentage des données OBS (13 %) et MERMAID (3 %) dans la base de données. En poursuivant les acquisitions de données avec les trois flotteurs MERMAID, en les redéployant au niveau de la zone d'étude ou en déployant de nouveaux flotteurs, on peut espérer une amélioration de la résolution après deux ans environ.

Zone résolue

Compte tenu de l'étendue et du nombre de rais étudiés, la résolution de notre zone est relativement réduite en surface et en profondeur. Celle-ci est illustrée sur les figures 3.35 et 3.36 en profondeur et 3.37 en coupe. Elle correspond aux zones où les damiers sont reconstitués après l'inversion. Sur ces figures sont représentées en première colonne les damiers, en deuxième colonne les solutions obtenues et en troisième les mêmes solutions avec les zones non résolues opacifiées. On remarque que l'ajout des données marines (OBS et MERMAID) apporte un petit gain dans la résolution (figures 3.32 et 3.33).

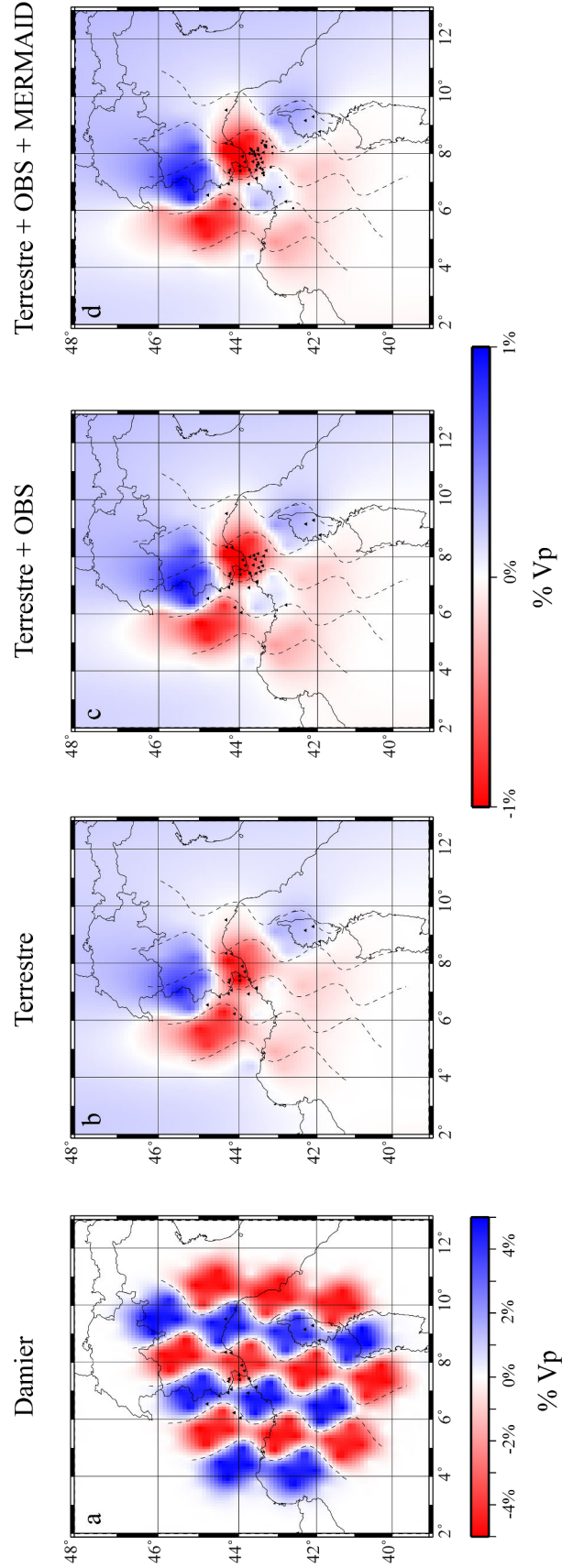


FIGURE 3.33 – Résultats des tests de résolution en damier pour une taille de voxels de 2×2 (156×156 km) à 226 km de profondeur. La première colonne représente le damier, les figures suivantes les solutions suivant trois types de jeux de données. Soit (1) les données des stations permanentes terrestres, (2) les données précédentes et les données des OBS de la campagne GROSMarin, enfin (3) les données précédentes avec les données des flotteurs MERMAID.

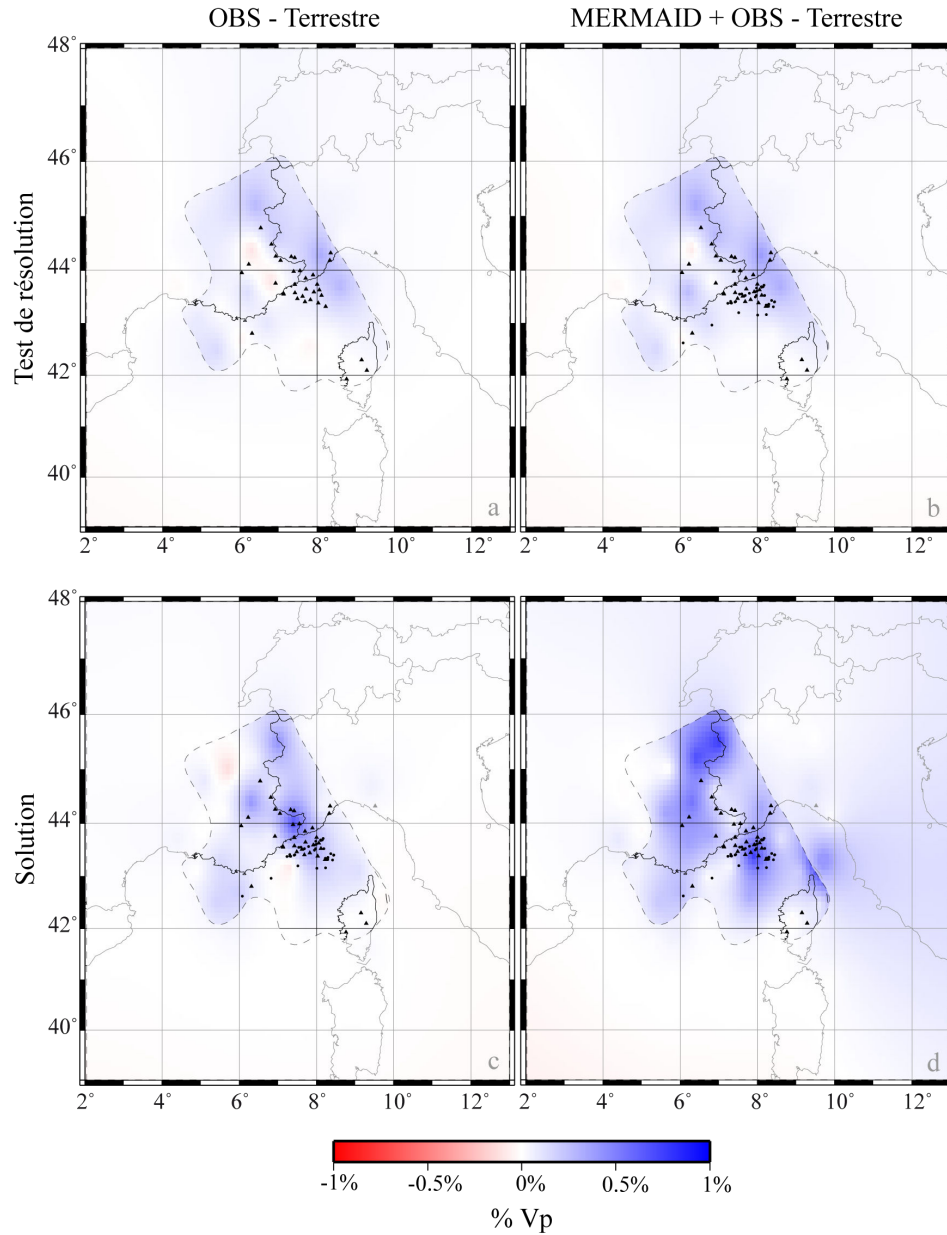


FIGURE 3.34 – Comparaison des solutions aux tests de résolution en damier en fonction du type de données. La figure *a* représente les résidus observés entre la solution du damier pour les données terrestres-OBS et terrestres (cas 2-1). La figure *b* représente les résidus obtenus entre la solution du damier pour les données terrestres-OBS-MERMAID et terrestres (cas 3-1). La figure *c* représente les résidus obtenus entre la solution des données terrestres-OBS et terrestres (cas 2-1). La figure *d* représente les résidus obtenus entre la solution des données terrestres-OBS-MERMAID et terrestres (cas 3-1). Les zones non résolues sont recouvertes d'un calque opacifiant. Les zones résolues sont délimitées par des pointillés.

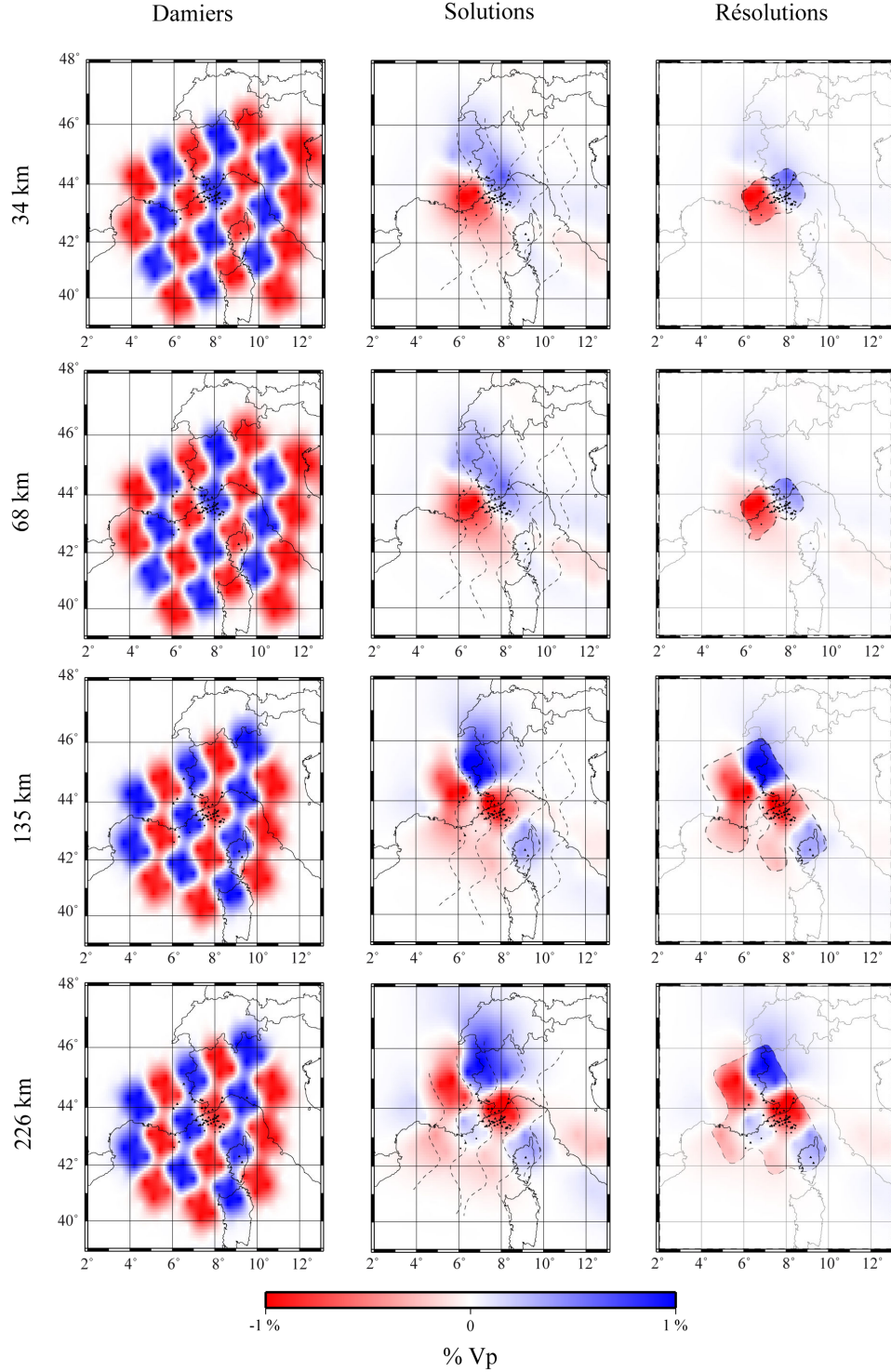


FIGURE 3.35 – Solutions des tests de résolution en damier dans le cas des jeux de données des stations terrestres, OBS et MERMAID pour les profondeurs 34, 68, 135 et 226 km. Les damiers sont présentés en première colonne, les solutions associées en deuxième colonne. La troisième colonne représente les solutions incluant les zones de résolution. Sur les figures des solutions, les intervalles entre les damiers des figures de la première colonne sont représentés en pointillés noirs. Dans la troisième colonne, les zones non résolues sont recouvertes d'un calque opacifiant et les contours des zones résolues sont marqués en pointillés noirs.

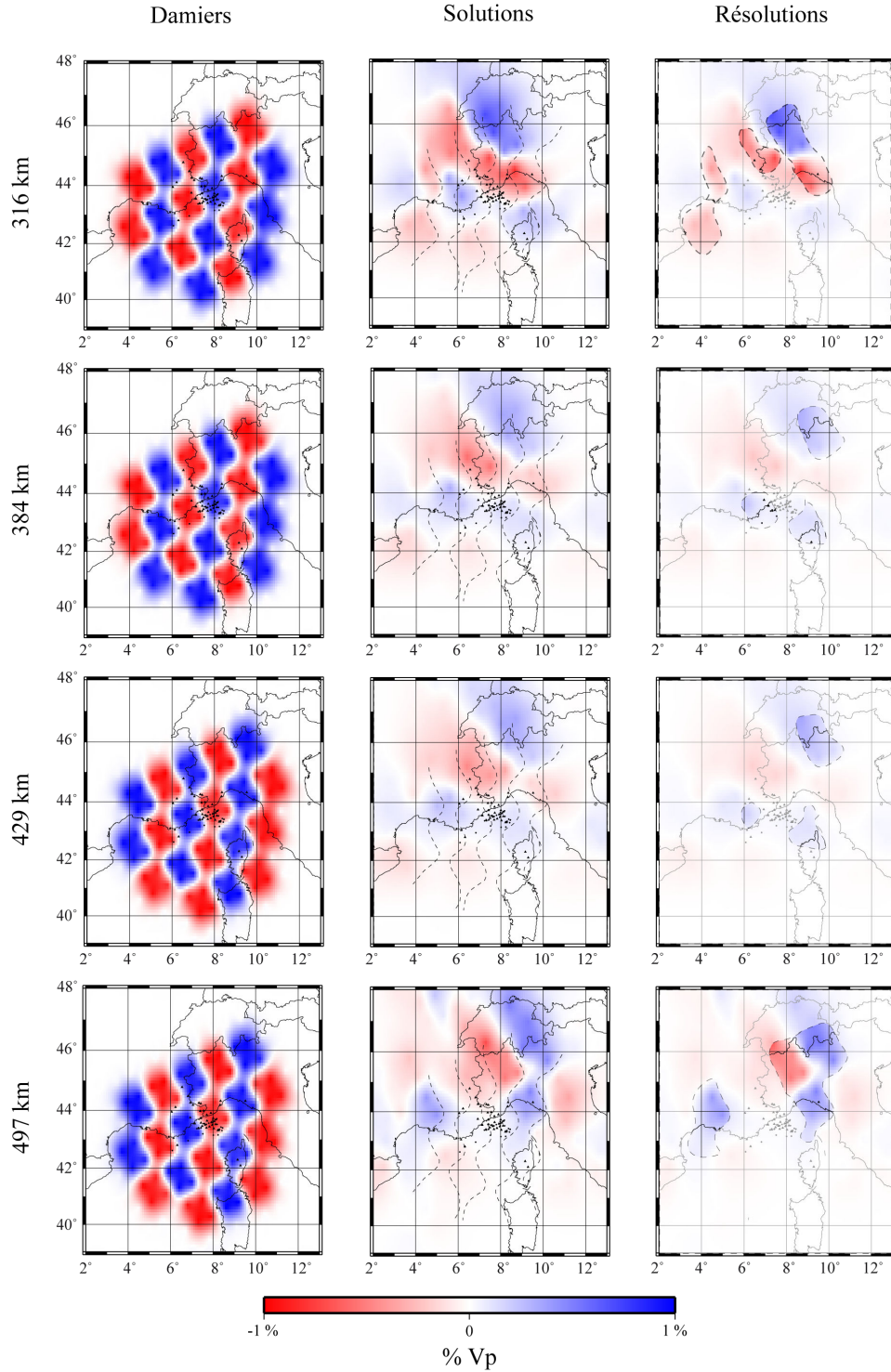


FIGURE 3.36 – Suite de la figure précédente pour les profondeurs 316, 384, 429 et 497 km. Les damiers sont présentés en première colonne, les solutions associées en deuxième colonne. La troisième colonne représente les solutions incluant les zones de résolution. Sur les figures des solutions, les intervalles entre les damiers des figures de la première colonne sont représentés en pointillés noirs. Dans la troisième colonne, les zones non résolues sont recouvertes d'un calque opacifiant et les contours des zones résolues sont marqués en pointillés noirs.

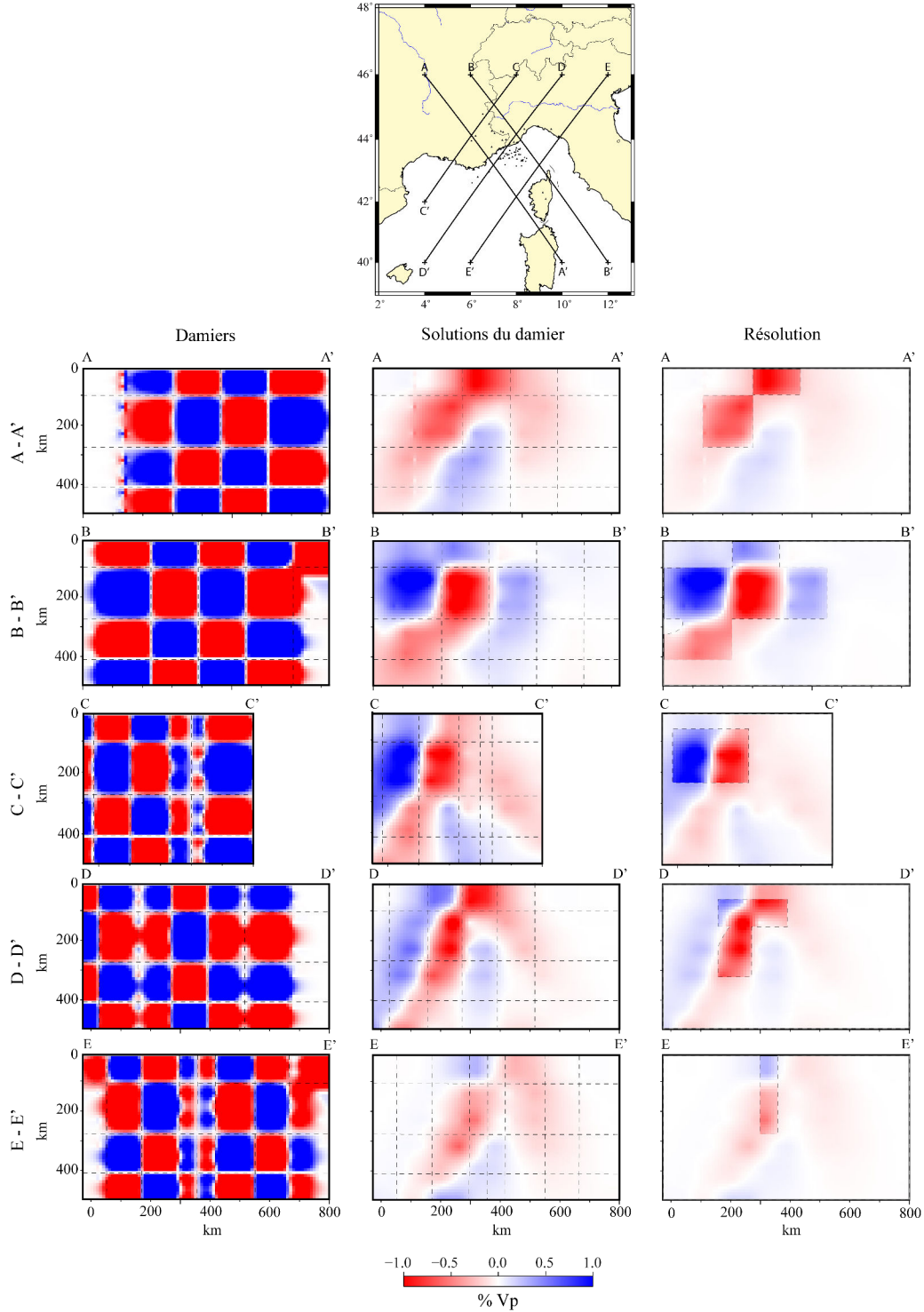


FIGURE 3.37 – Solutions des tests de résolution en damier dans le cas des jeux de données des stations terrestres, OBS et MERMAID pour les coupes AA', BB', CC', DD' et EE'. Les damiers sont présentés en première colonne, les solutions associées en deuxième colonne. La troisième colonne représente les solutions incluant les zones de résolution. Sur les figures des solutions, les intervalles entre les damiers des figures de la première colonne sont représentés en pointillés noirs. Dans la troisième colonne, les zones non résolues sont recouvertes d'un calque opacifiant et les contours des zones résolues sont marqués en pointillés noirs.

b. Tests de résolution en sphère gaussienne

Nous avons également réalisé des tests de résolution en sphère de Gauss à partir des profondeurs montrant la meilleure résolution aux tests de résolution en damier, soient 135 et 226 km. A la différence des tests en damier, il ne s'agit plus d'introduire des sauts de vitesse, mais un gradient lisse (dans notre cas une anomalie positive de +5 %). Nous avons testé la résolution de notre modèle à partir de plusieurs profondeurs de sphères et étudié les solutions de l'inversion à partir des données terrestres, OBS et MERMAID. Les résultats obtenus sont illustrés en figure 3.38.

Nous observons que la forme de la sphère est bien reconstruite dans les quatre cas. Les contours sont davantage marqués dans la partie nord de la sphère, grâce à la position de notre réseau. L'amplitude de l'anomalie introduite n'est pas reproduite puisque le maximum de l'échelle de couleur est de $\pm 2\%$ pour une anomalie introduite de $\pm 5\%$. On observe, cependant, une meilleure reconstitution de l'anomalie de vitesse ($\pm 2\%$) que le test de résolution en damier ($\pm 1\%$). Ce résultat est lié au type d'anomalie introduite. On introduit un gradient lisse et plus des sauts de vitesse.

3. Solutions

Cette étude nous a permis de valider l'incorporation des données des flotteurs dans une inversion tomographique. Les histogrammes des résidus des temps de trajets observés en fonction des jeux de données sont illustrés en figure 3.39. Après la procédure d'inversion, nous observons que 67 % des données des flotteurs MERMAID ont un résidu compris entre $\pm 0,17$ s. La présence de valeurs aberrantes (20 % $> 0,50$ s) met en évidence la nécessité de développer une technique plus sophistiquée, pour déterminer les temps des arrivées des ondes P , que la méthode visuelle, notamment lorsque les sismogrammes sont bruités.

Bien que le résultat de la tomographie n'est que préliminaire, il est nécessaire de vérifier la validité de nos observations avec les travaux précédemment réalisés. La mer Méditerranée a été imagée par de nombreuses études tomographiques, locales, régionales et globales, à différentes échelles de profondeur et de surface et à partir de différentes sources de données sismologiques.

A l'échelle de la mer Méditerranée, l'étude de [Piromallo et Morelli, 2003](#) propose une image tomographique allant jusqu'à 950 km de profondeur, basée sur l'étude des anomalies de vitesse des ondes P téléseismiques. [Spakman et Wortel, 2004](#) proposent une étude de la mer Méditerranée occidentale et centrale également en termes d'anomalies de vitesse des ondes P jusqu'à 1000 km de profondeur. Enfin, à cette échelle, [Stehly et al., 2009](#) proposent une étude de la mer Méditerranée Occidentale allant jusqu'à 70 km de profondeur, basée sur l'étude du bruit sismique ambiant.

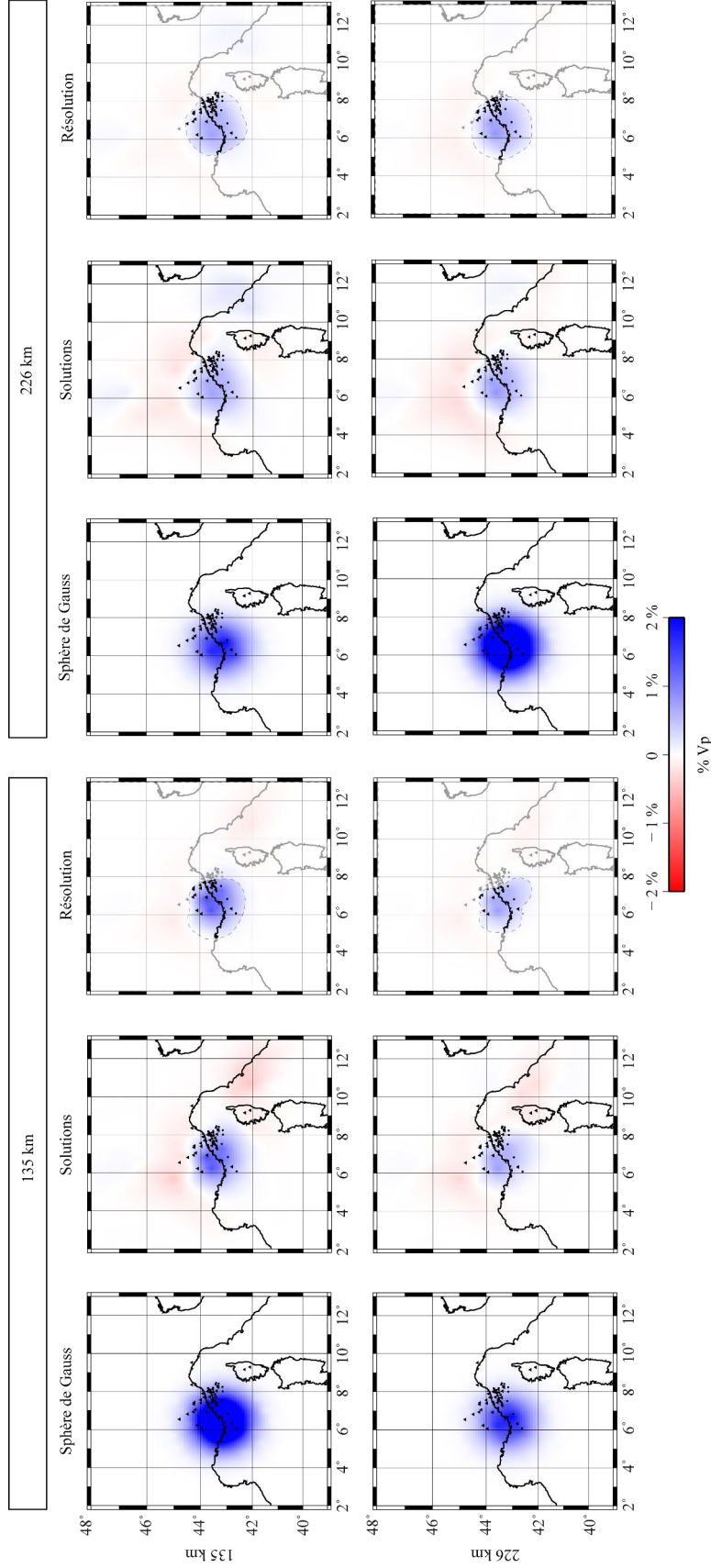


FIGURE 3.38 – Tests de résolution en sphère de Gauss. La première ligne présente les résultats obtenus aux profondeurs 135 et 226 km pour une sphère gaussienne centrée à 135 km. La deuxième ligne présente les résultats obtenus aux profondeurs 135 et 226 km pour une sphère gaussienne centrée à 226 km. Les première et quatrième colonnes présentent l'anomalie à retrouver, la sphère de Gauss avant inversion alors que les deuxième et cinquième colonnes la présentent après inversion. Les troisième et sixième colonnes montrent les zones résolues des solutions. Les zones non résolues sont recouvertes d'un calque opacifiant et les contours des zones résolues sont marqués en pointillés noirs.

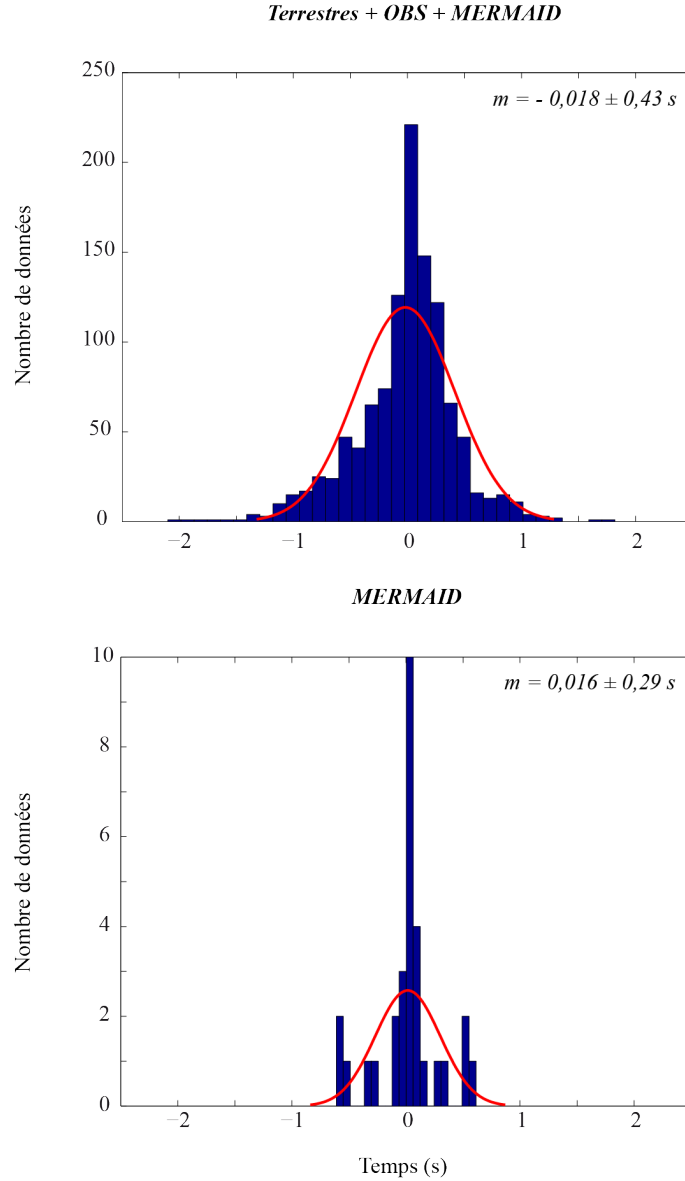


FIGURE 3.39 – Histogrammes des résidus observés pour tous les jeux de données et les données MERMAID seules.

A l'échelle de l'Italie, [Di Stefano *et al.*, 2009](#) proposent une étude basée sur les ondes P allant jusqu'à 80 km de profondeur. Concentrés sous la partie nord de l'Italie, les travaux de [Scafidi et Solarino, 2012](#) et [Lippitsch *et al.*, 2003](#) proposent respectivement des études à partir de séismes locaux et de télé-séismes allant jusqu'à des profondeurs de 100 et 400 km. Les travaux de [Diehl *et al.*, 2009](#) proposent une étude focalisée sur l'arc Alpin à partir de séismes locaux et d'une résolution allant jusqu'à 80 km de profondeur. Néanmoins, ces études se trouvent à la limite, voire en-dehors, de notre zone d'intérêt.

A l'échelle du bassin Ligure, les études de [Dessa *et al.*, 2011](#) et [Eva *et al.*, 2001](#) proposent des images tomographiques, respectivement basées sur des profils de sismique réfraction avec une résolution allant jusqu'à 25 km de profondeur et sur l'étude de séismes locaux pour une image allant jusqu'à 50 km de profondeur.

Compte-tenu de la taille des voxels et du type d'étude réalisée, nous comparons nos résultats aux travaux de [Piromallo et Morelli, 2003](#) (figure 3.40) et [Spakman et Wortel, 2004](#) (figure 3.41).

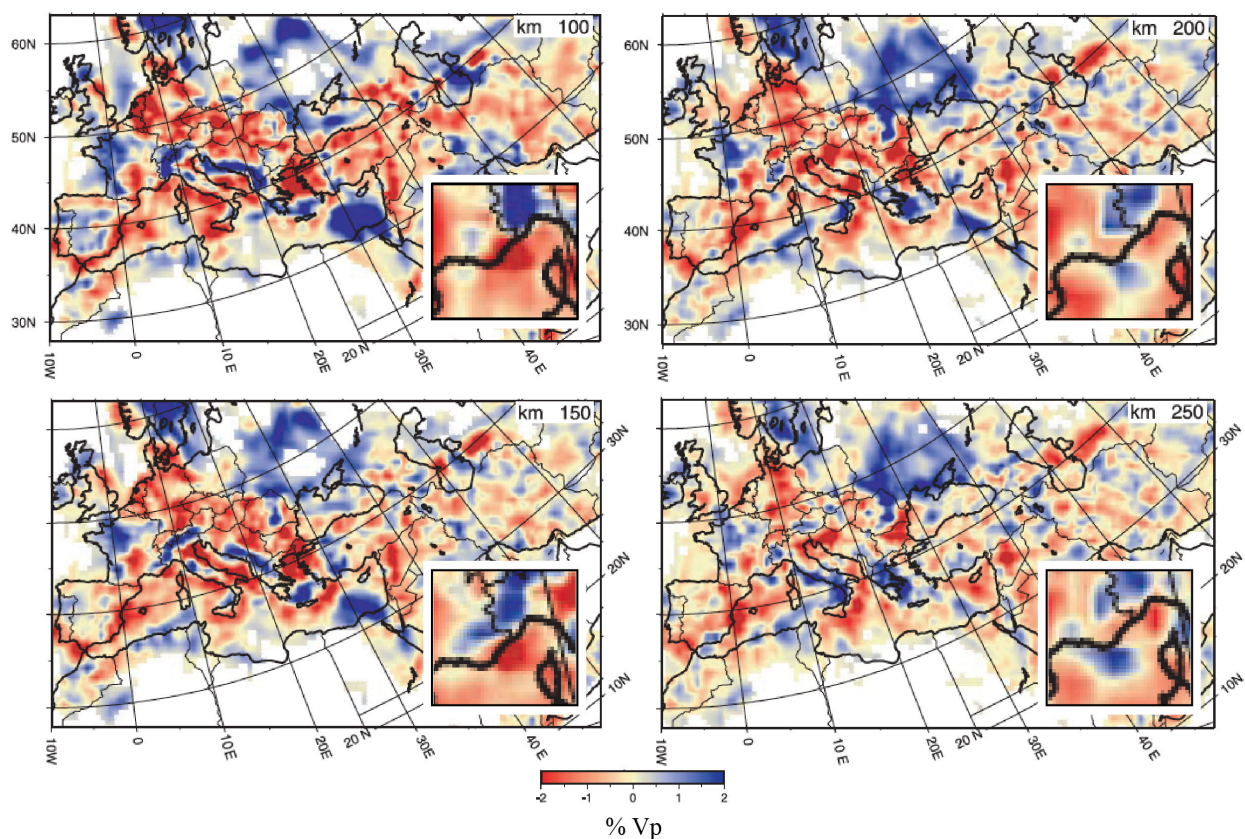


FIGURE 3.40 – Travaux de [Piromallo et Morelli, 2003](#) à 100, 150, 200 et 250 km de profondeur, un zoom sur la zone d'étude est disponible en bas à droite des images. Modifié d'après [Piromallo et Morelli, 2003](#).

La zone résolue des solutions étant relativement restreinte (figures 3.35, 3.36 et 3.37), nous recoupons nos observations avec les études préalablement réalisées sur la zone et concordantes avec notre échelle en profondeur. Les solutions de nos inversions tomographiques sont présentées sur les figures 3.42 et 3.43 pour différentes profondeurs et en figures 3.44 et 3.45 en coupe.

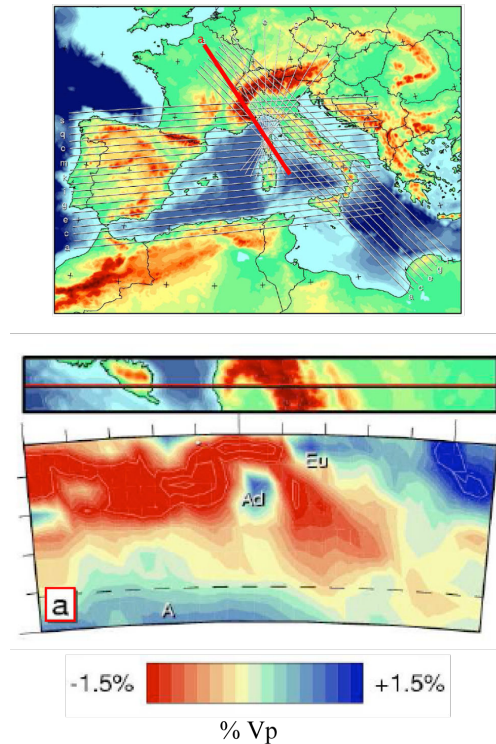


FIGURE 3.41 – Travaux de [Spakman et Wortel, 2004](#), dans le cas du profil (a), nord-ouest sud-est. Modifié d'après [Spakman et Wortel, 2004](#).

a. Comparaison aux travaux de [Piromallo et Morelli, 2003](#)

Compte-tenu de la faible résolution des solutions aux profondeurs 34, 68 et de 316 à 497 km (figure 3.42), nous allons nous intéresser principalement aux profondeurs de 135 et 226 km. Les solutions à ces dernières profondeurs sont illustrées en figure 3.43 à échelle de couleur équivalente aux travaux de [Piromallo et Morelli, 2003](#) ($\pm 2\%$).

Sur les images tomographiques de [Piromallo et Morelli, 2003](#) à la profondeur de 100 km, nous observons une franche anomalie positive au nord-ouest de l'Italie ainsi qu'une anomalie négative au niveau de la côte sud-est de la France à cheval entre terre et mer.

Cette anomalie se décale vers le bassin à 150 km de profondeur, tandis que l'anomalie positive au nord évolue vers le sud-ouest de la France. Sur nos travaux à 135 km de profondeur, nous observons la franche anomalie positive à cheval entre le nord-ouest de l'Italie et le sud-est de la France (unité I, figure 3.43). L'anomalie négative au sud est partiellement reconstruite sur notre solution (unité II, figure 3.43), notamment à cause du manque de résolution dans cette zone. A proximité de la Corse, nos observations sur l'anomalie négative (unité III, figure 3.43) sont cohérentes avec les observations

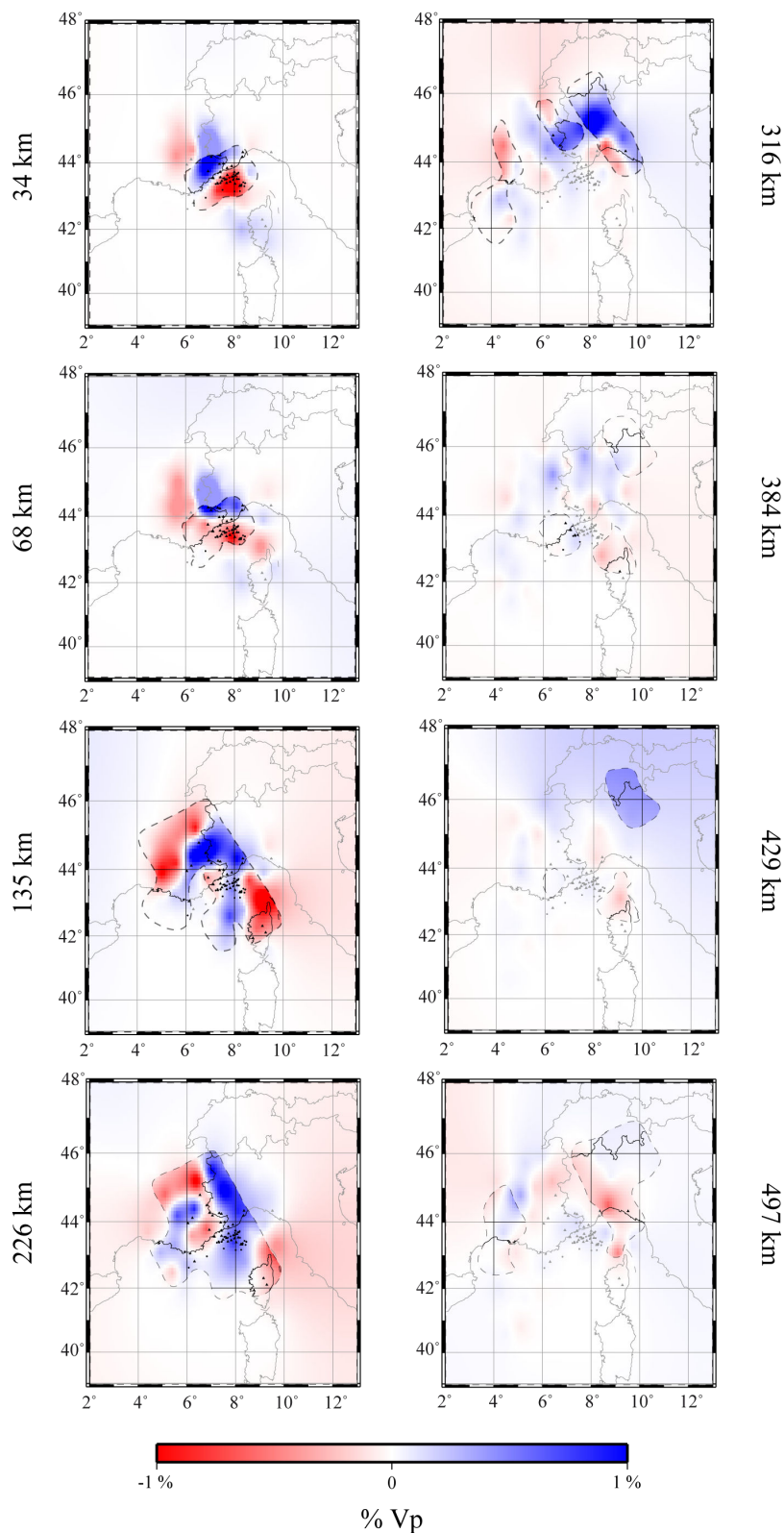


FIGURE 3.42 – Solutions de l'inversion dans le cas des jeux de données des stations terrestres, OBS et MERMAID pour les profondeurs 34, 68, 135, 226, 316, 384, 429 et 497 km. Les zones non résolues sont recouvertes d'un calque opacifiant et les contours des zones résolues sont marqués en pointillés noirs.

de [Piromallo et Morelli, 2003](#) aux profondeurs 100 et 150 km, néanmoins nous observons dans le bassin Ligure une anomalie positive (unité IV, figure 3.43) qui n'est pas observée aux profondeurs 100 et 150 km de [Piromallo et Morelli, 2003](#).

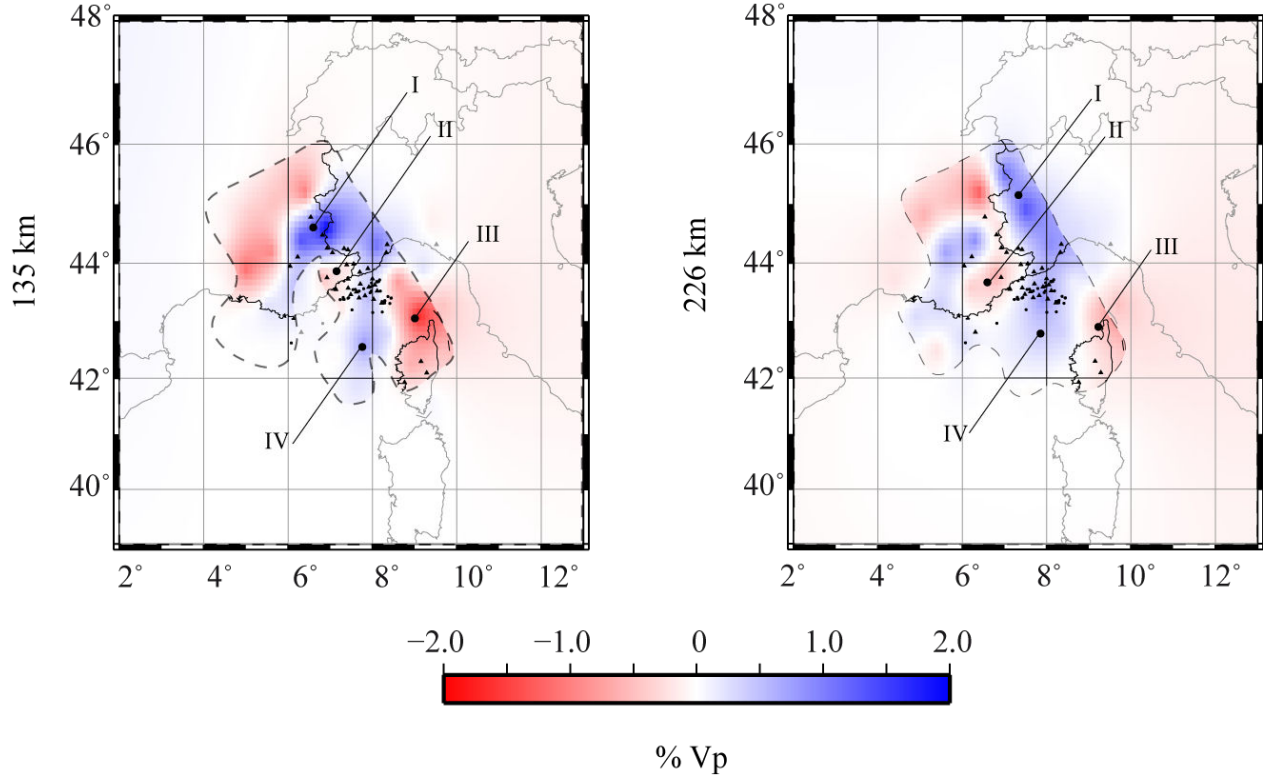


FIGURE 3.43 – Solutions dans le cas des jeux de données des stations terrestres, OBS et MERMAID pour les profondeurs de 135 et 226 km. Les zones non résolues sont recouvertes d'un calque opacifiant et les contours des zones résolues sont marqués en pointillés noirs. L'échelle de couleur est de $\pm 2\%$. Les unités citées dans le texte sont notées en chiffres romains sur les figures.

Sur les travaux de [Piromallo et Morelli, 2003](#) à la profondeur de 200 km, nous observons l'apparition d'une anomalie positive dans le bassin Ligure au niveau de la pointe du Var (sud-est de la France) qui semble s'étendre à terre à l'ouest à 250 km. L'anomalie du nord-ouest italien et sud-est français est toujours présente à ces deux profondeurs. Sur nos travaux à 226 km de profondeur, nous retrouvons l'anomalie de l'unité I (figure 3.43), cependant son étendue est plus importante, probablement due à l'échelle de couleur, l'amplitude étant plus faible dans nos travaux ($\pm 1\%$). Dans les travaux de [Piromallo et Morelli, 2003](#), les deux anomalies positives observées dans la zone d'étude sont distinctes, alors que dans nos observations ces anomalies semblent se rejoindre sous notre réseau de stations (unité IV, figure 3.43). L'unité II est également présente dans notre solution. L'anomalie négative de l'unité III au niveau de la Corse est cohérente avec les observations de [Piromallo et Morelli, 2003](#).

A échelle de couleurs équivalentes avec les travaux de [Piromallo et Morelli, 2003](#), nous ne reproduisons pas les amplitudes des anomalies ($\pm 2\%$), nos observations sont de l'ordre de $\pm 1\%$.

En conclusion, nous observons une cohérence des anomalies observées, mais nous constatons un lien entre les anomalies positives au nord et au sud de la zone qui n'est pas observé sur les travaux de [Piromallo et Morelli, 2003](#).

b. Comparaison aux travaux de [Spakman et Wortel, 2004](#)

Les solutions vues en coupe sont illustrées en figure [3.44](#), suivant cinq profils quadrillant la zone d'étude, du nord-ouest au sud-est (profils AA' et BB') et du nord-est au sud-ouest (profils CC', DD' et EE'). La résolution de la solution étant la plus importante sur le profil BB' (figure [3.45](#)), nous allons nous intéresser à ce dernier.

En comparant le profil B'B au profil *a* de [Spakman et Wortel, 2004](#) (figure [3.41](#)), nous observons que l'anomalie positive dénommée *Ad*, est reproduite sur notre solution au niveau de l'unité I. Cette dernière est entourée par deux anomalies négatives (unités II et III sur la figure [3.45](#)) également existantes sur les travaux de [Spakman et Wortel, 2004](#). Néanmoins, l'anomalie positive de l'unité I semble se poursuivre vers la surface et en profondeur dans la direction du nord-est du profil au niveau des unités IV et V (figure [3.45](#)), alors que cette observation n'est pas faite dans les travaux de [Spakman et Wortel, 2004](#). Malgré ces différences, il y a une cohérence entre nos observations et les travaux de [Spakman et Wortel, 2004](#).

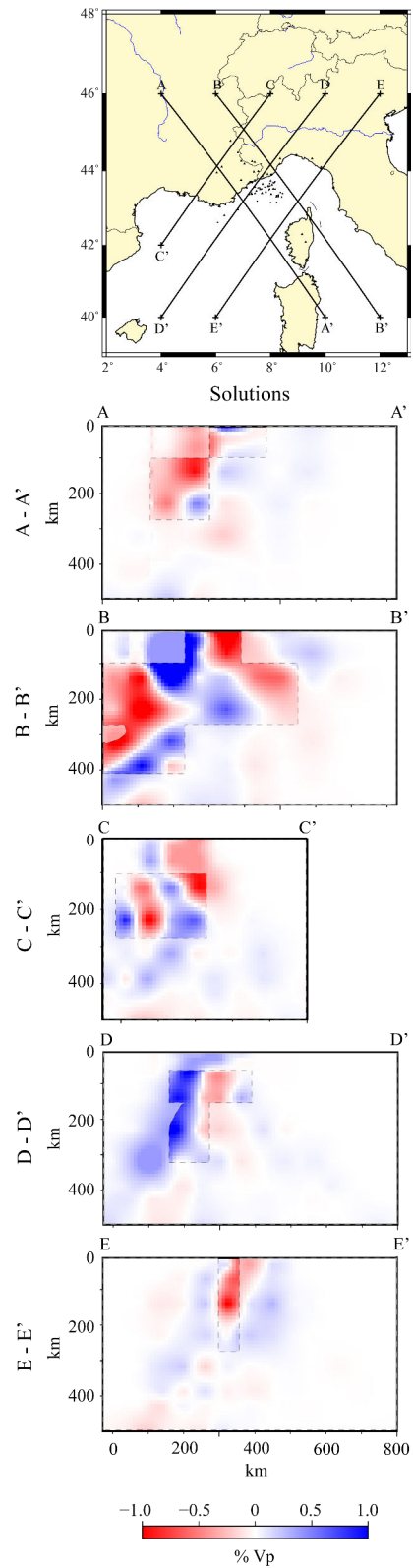


FIGURE 3.44 – Solutions en coupe dans le cas des jeux de données des stations terrestres, OBS et MERMAID pour les coupes AA', BB', CC', DD' et EE'. Les zones non résolues sont recouvertes d'un calque opacifiant et les contours des zones résolues sont marqués en pointillés noirs.

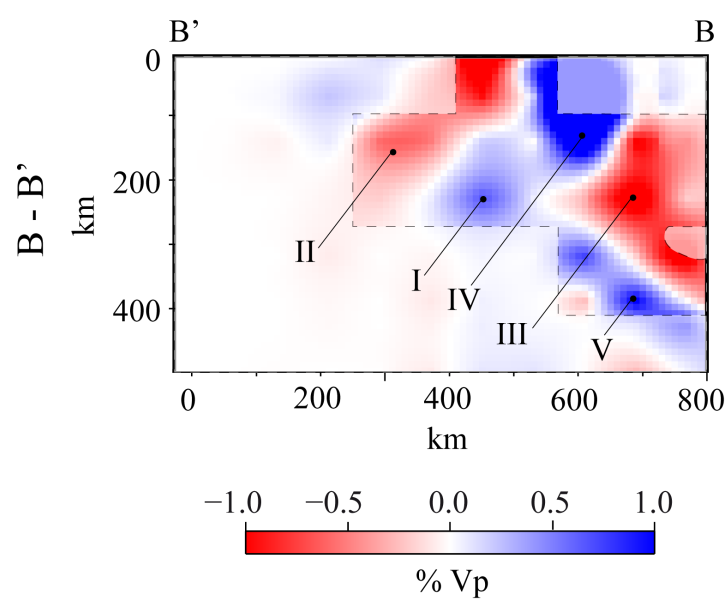


FIGURE 3.45 – Solution vue en coupe dans le cas des jeux de données des stations terrestres, OBS et MERMAID pour la coupe B'B. Les zones non résolues sont recouvertes d'un calque opacifiant et les contours des zones résolues sont marqués en pointillés noirs. Les unités citées dans le texte sont notées en chiffres romains sur la figure.

Discussion et perspectives

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'incorporation des données sismologiques de flotteurs MERMAID, dans le cas d'une inversion tomographique appliquée au bassin Ligure (mer Méditerranée, figure 3.1). Nous avons développé un protocole de pré-traitement nécessaire à ce nouveau type de données et nous avons validé leur utilisation dans une étude tomographique.

Trois flotteurs ont été déployés dans le bassin Ligure, durant les six premiers mois d'acquisitions, ils ont enregistré 27 séismes, représentant 60 pointés. Les résidus de temps de trajets ont été validés par comparaison avec les données d'un réseau de stations sismologiques OBS et terrestres, utilisant ainsi trois types de récepteurs (partie II de ce chapitre).

Le choix du bassin Ligure s'est avéré stratégique à plusieurs niveaux :

- Sa proximité géographique rend les déploiements et récupérations des flotteurs aisés.
- Notre volonté de valider les données des flotteurs MERMAID a été facilitée par l'existence des données marines (OBS) de la campagne GROSMarin (Dessa, 2009, Dessa *et al.*, 2011). Les étapes de pré-traitement des données, notamment la correction de l'immersion des flotteurs, ont été facilitées par la mise à disposition de données bathymétriques à haute résolution des campagnes MALISAR (Migeon *et al.*, 2011, Migeon et Larroque, 2008, Migeon et Larroque, 2007 et Migeon et Larroque, 2006).
- Le bassin Ligure représente un faible niveau de bruit en comparaison avec d'autres lieux de déploiements des flotteurs, notamment, dans l'océan Indien. Sur les six mois d'acquisitions des flotteurs, la plus basse magnitude enregistrée, est celle du séisme de Barcelonnette ($M_w = 4,8$ (07/04/2014)). Des magnitudes de $M_w = 5,1$ et $M_w = 5,2$ ont été observées pour des séismes en provenance respectivement, de l'Islande (11/09/2014) et de la Turquie (04/09/2014). A plus grandes distances, des magnitudes $M_w = 5,5$ et $M_w = 5,7$ ont été observées pour des séismes en provenance de l'Alaska (07/06/2014) et de la ride médio - Atlantique (13/03/2014). La magnitude maximale observée est de $M_w = 8,2$ et correspond au séisme de la côte nord du Chili (01/04/2014).
- La Mer Méditerranée a été préalablement imagée par de nombreuses études de tomographie, nous permettant de comparer nos observations à ces précédents travaux.

Le caractère dérivant des flotteurs permet de couvrir de larges régions marines peu instrumentées et ouvre ainsi les océans et mers à la tomographie (Simons *et al.*, 2006). Les principaux avantages et inconvénients de l'utilisation des flotteurs MERMAID sont listés dans le tableau 3.10.

	Avantages	Inconvénients
Dérive	Permet de couvrir des zones maritimes peu instrumentées.	Pas de contrôle sur la trajectoire.
Aspect technique et de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Coût</i> : relativement faible (≈ 18 k€, incluant la carte scientifique). • <i>Mise en œuvre</i> : largage depuis des bateaux de petites tailles et sans nécessiter de matériel de déploiement. • <i>Mémoire</i> : capacité de 128 événements (≈ 20 ko/signal). • <i>Récupération des données</i> : récupération des données quasiment en temps réel après un séisme. 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Coût</i> : si le flotteur n'est pas récupéré sa durée de vie est de ≈ 140 cycles. • <i>Coût</i> : il faut rajouter le prix d'une communication par satellite (1 k€/an, envois de 100 ko/communication). • <i>Mémoire</i> : les enregistrements ne sont pas continus comme avec des stations terrestre ou OBS. • <i>Récupération des données</i> : nécessite un minimum de suivi et de surveillance, comme pour les autres types de stations.
Pré-traitement des données	<ul style="list-style-type: none"> • Développement d'une méthode de pré-traitement des données avec quantification des erreurs introduites. • Validation de l'utilisation des données dans une étude tomographique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite des étapes supplémentaires par rapport à des données terrestres et d'OBS. • La dérive du flotteur dans la colonne d'eau est considérée comme négligeable. • Nécessite des cartes bathymétriques de bonnes résolutions.
Tomographie	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Résolution</i> : gain dans la reconstitution des damiers du test de résolution après utilisation des données MERMAID. • <i>Solution</i> : comparaison cohérente avec les travaux de Spakman et Wortel, 2004, Piromallo et Morelli, 2003. 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Résolution</i> : petit jeu de données MERMAID. • <i>Solution</i> : zone actuellement faiblement résolue.

TABLEAU 3.10 – Principaux avantages et inconvénients de l'utilisation des flotteurs MERMAID.

L'utilisation des données des flotteurs nécessite des étapes de pré-traitement pour une étude tomographique :

- Étude des journaux de bord. Cela met en évidence des problèmes éventuels, notamment de la dérive d'horloge (cas du flotteur M31).
- Correction de la dérive de surface. Cette dérive est corrigée par une interpolation linéaire réalisée à partir des points GPS en surface.
- Correction de l'immersion des flotteurs lors de la détection d'un événement. L'immersion des flotteurs entre deux eaux pose la question de leur localisation dans l'espace. La correction est réalisée à partir de données de campagnes bathymétriques, dans notre cas de haute résolution (résolution horizontale de 25 m). Pour de futurs déploiements, la bathymétrie des fonds marins et la résolution horizontale des cartes seront à prendre en compte. Pour définir la résolution minimum de la bathymétrie, nous pouvons utiliser la zone de Fresnel. Sur la figure 3.46, on souhaite connaître la distance D nécessaire entre deux points de la bathymétrie

en fonction de l'immersion des flotteurs. On veut :

$$a - z \leq \frac{\lambda}{4} \quad (3.9)$$

Avec $a^2 = z^2 + D^2/4$ et λ la longueur d'onde. On obtient l'équation :

$$D = \sqrt{2z\lambda + \frac{\lambda^2}{4}} \quad (3.10)$$

Appliqué à notre étude sur le bassin Ligure, avec une immersion des flotteurs à environ 1500 m, une bathymétrie moyenne à environ 2200 m et une fréquence de 1 Hz, nous obtenons une distance $D = 1632$ m, bien au-dessus de la résolution de 25 m dont nous disposons. Si on s'intéresse par exemple au flotteur MERMAID 12, déployé dans l'océan Indien, avec une profondeur de déploiement du flotteur et une fréquence similaires, pour une bathymétrie moyenne de 3620 m, on obtient $D = 2631$ m.

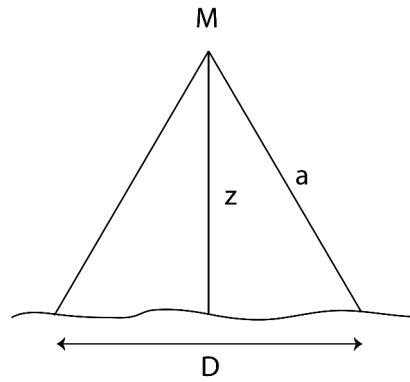


FIGURE 3.46 – Zone de Fresnel et étude de la résolution minimum nécessaire des cartes bathymétriques.

- Correction des séismes sans remontée automatique. Une étude de la trajectoire des flotteurs en profondeur, basée sur une interpolation de Bézier ([Bézier, 1987](#) et [Bézier, 1977](#)) est nécessaire. Dans le cas des données traitées, tous les événements sont considérés comme recevables pour l'étude tomographique. Pour une utilisation optimale des données des flotteurs, la conservation de ces signaux peut se poser. Néanmoins, les erreurs sur les temps d'arrivées des ondes doivent être ajustées en conséquence. Pour une utilisation future, l'automatisation de cette procédure deviendra nécessaire et l'établissement d'un seuil de conservation de ces données se posera.

Ces étapes de pré-traitement introduisent des erreurs que nous avons estimées et prises en compte, notamment en affectant un écart-type des lectures des temps d'arrivées des phases P , plus important que dans le cas des autres types de données. Cette étude a permis de valider l'utilisation des données

des flotteurs (figure 3.39) et de développer une méthodologie de pré-traitement de ce nouveau type de données.

Nous observons déjà un léger gain dans la résolution de l'image tomographique après l'intégration des jeux de données marines. Le damier est mieux reconstitué lors des tests de résolution (figures 3.32 et 3.33). Ceci est observé malgré le faible pourcentage des données MERMAID (3 %) et marines (13 %) en comparaison avec les données des stations terrestres (84 %). Ces premières observations nous donnent l'espoir qu'avec deux années de données supplémentaires, l'image tomographique de la région sera améliorée.

Nous observons une cohérence entre les solutions obtenues et les travaux de [Spakman et Wortel, 2004](#) ainsi que ceux de [Piromallo et Morelli, 2003](#), bien que la zone résolue de notre étude soit limitée dans l'espace (figures 3.42 et 3.44).

Afin d'approfondir cette étude, il est nécessaire d'ajouter des données de flotteurs MERMAID, notamment en identifiant la source du problème d'horloge ayant amputé 30 % des données acquises par les flotteurs, ainsi qu'en effectuant de nouvelles acquisitions. L'ajout de données sismologiques des réseaux terrestres permettra également d'accroître la base de données, notamment en élargissant les bornes de sélection de séismes utilisées en partie II de ce chapitre.

Une étude de plus vaste envergure est actuellement en cours aux abords des îles des Galapagos (Equateur, [Villagómez et al., 2014](#)) afin d'étudier le panache mantellique sous ces dernières. Pour cela, dix flotteurs ont été déployés au mois de mai 2014 et sont actuellement en acquisition.

Conclusions

Le travail développé durant cette thèse s’inscrit dans le projet GLOBALSEIS, dont l’un des objectifs est d’utiliser les données acquises par des hydrophones montés sur des flotteurs dérivants, à des fins sismologiques. Nous nous sommes intéressés aux hydrophones ainsi qu’à la calibration de celui du flotteur, dans une thématique d’étude à basses fréquences. Nous avons proposé une validation des données acquises avec une application concrète dans une étude tomographique sur le bassin Ligure.

En conclusion de cette thèse, nous pouvons reprendre les objectifs présentés en introduction et énoncer les conclusions et perspectives associées à chaque chapitre.

Dans le premier chapitre, nous réalisons une étude générale sur les hydrophones. A partir du logiciel multi-physiques COMSOL, de céramiques et d’hydrophones à notre disposition, nous avons construit des modèles numériques afin de prédire les sensibilités des transducteurs. Les résultats obtenus nous ont permis d’estimer l’ordre de grandeur des niveaux émis et reçus, les fréquences de résonances ainsi que la bande de fréquences d’utilisation des transducteurs. A partir de géométries simples, les modèles ont montré des décalages dans les niveaux de la sensibilité et valeurs des fréquences de résonance.

Néanmoins, afin de proposer un hydrophone viable à de grandes immersions et à basses fréquences, nous avons utilisés ces modèles et nous nous sommes inspirés des hydrophones étudiés. Nous avons développé les différentes étapes et choix effectués pour la réalisation du design de l’hydrophone. Nous avons utilisé les modèles construits afin d’estimer les sensibilités et la directivité de l’hydrophone. Malheureusement, le logiciel ne nous a pas permis d’étudier sa réponse en-dessous de 10 Hz. La principale perspective de ces travaux sera de concevoir le prototype proposé et de réaliser des tests en laboratoire afin de confirmer ou d’infirmer les résultats des modélisations.

Dans le second chapitre, après un inventaire des techniques de calibration d’hydrophone à basses fréquences, nous présentons la calibration «dynamique». La présence de rebonds dans les signaux acquis et la finalisation de la carte électronique du flotteur MERMAID, nous ont convaincus de

faire évoluer cette méthode vers une méthode «statique». Nous proposons donc cette seconde méthode, que nous avons testée sur la chaîne complète d’acquisition des flotteurs : l’hydrophone avec la carte électronique. Nous avons développé une méthode simple et stable permettant de déterminer les pôles et zéros du système. Nous avons appliqué cette méthode aux enregistrements de trois flotteurs MERMAID déployés en mer Méditerranée, ayant enregistré le séisme de Barcelonnette du 07/04/2014 ($M_w = 4,8$). De cette façon, nous obtenons une estimation de la variation de pression générée par l’arrivée de l’onde P , qui est d’environ 500 Pa.

Dans le troisième chapitre, nous étudions les données acquises par les flotteurs MERMAID. Afin de valider leur utilisation, nous étudions les données dans le cadre d’une étude tomographique du bassin Ligure, basée sur la lecture de phase des ondes P de séismes. Nous développons un protocole de pré-traitement, nécessaire à ce nouveau type de données. Nous validons l’incorporation de ces données dans une étude tomographique, que nous avons également réalisée avec des données de stations terrestres et de fond de mer et dont l’écart-type, pour 67 % d’entre elle, est de 0,17s. L’incorporation de ces données a également mis en évidence une légère amélioration de la résolution de l’image tomographique. Nos observations sont compatibles avec les travaux de [Piromallo et Morelli, 2003](#) et [Spakman et Wortel, 2004](#) malgré la faible étendue de la zone résolue. Une première perspective à cette étude sera d’accroître la résolution de l’image en ajoutant des données de stations terrestres et de flotteurs. Une seconde perspective pourrait être une automatisation du protocole de pré-traitement des données. Une étude de plus grande envergure est actuellement en cours aux abords des îles Galapagos, avec le déploiement de dix flotteurs, pour une durée d’acquisitions de deux ans.

Annexes

Annexe A

Support de l'hydrophone

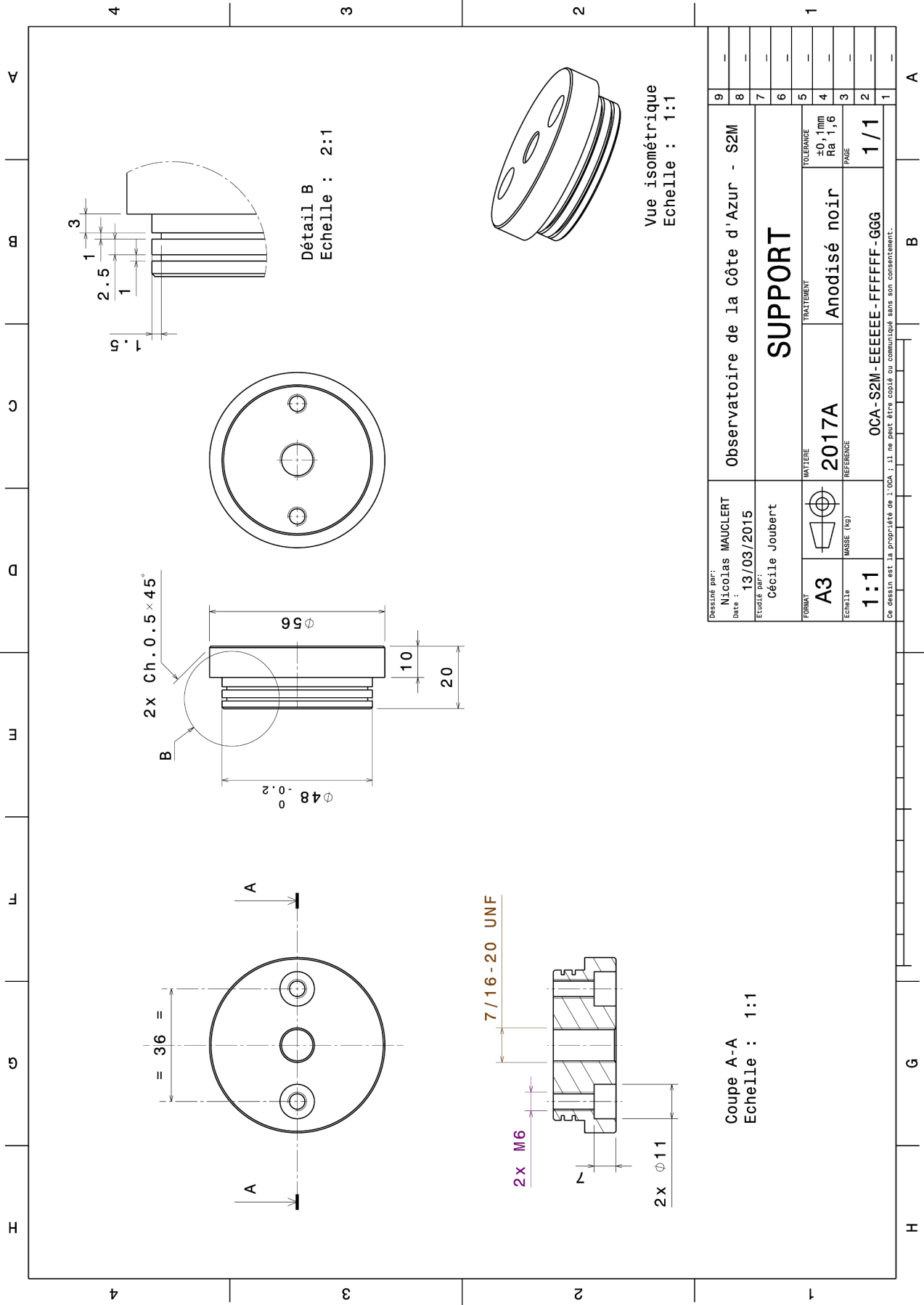


FIGURE A.1 – Support de l'hydrophone proposé.

Annexe B

Calcul du spectre d'entrée $F(\omega)$

La fonction $F(\omega)$ peut s'écrire comme la somme de deux fonctions :

$$F(\omega) = \int_0^\tau \frac{t}{\tau} e^{i\omega t} dt + \int_\tau^\infty e^{i\omega t} dt = \frac{e^{i\omega\tau} - 1}{\omega^2 \tau} \rightarrow F(\omega) = f_1(\omega) + f_2(\omega) \quad (\text{B.1})$$

Résolution de $f_1(\omega)$ par intégration par parties :

$$\int_a^b u(x) v'(x) dx = [u(x) v(x)]_a^b - \int_a^b u'(x) v(x) dx \quad (\text{B.2})$$

On pose :

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{t}{\tau} \Rightarrow u'(t) = \frac{1}{\tau} \\ v(t) &= \frac{1}{i\omega} e^{i\omega t} \Rightarrow v'(t) = e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

On résout :

$$f_1(\omega) = \left[\frac{t}{i\tau\omega} e^{i\omega t} \right]_0^\tau - \int_0^\tau \frac{e^{i\omega t}}{i\tau\omega} dt = \frac{e^{i\omega\tau}}{i\omega} - \int_0^\tau \frac{e^{i\omega t}}{i\omega\tau} dt \quad (\text{B.4})$$

$$f_1(\omega) = \frac{e^{i\omega\tau}}{i\omega} - \left[\frac{e^{i\omega t}}{i^2\tau\omega^2} \right]_0^\tau = \frac{e^{i\omega\tau}}{i\omega} - \left[-\frac{e^{i\omega t}}{\tau\omega^2} \right]_0^\tau \quad (\text{B.5})$$

$$f_1(\omega) = \frac{e^{i\omega\tau}}{i\omega} + \frac{e^{i\omega\tau}}{i\omega^2} - \frac{1}{i\omega^2} \quad (\text{B.6})$$

Résolution de $f_2(\omega)$ par le théorème des fonctions généralisées :

On pose $e^{-\beta t}$ avec $\beta > 0$:

$$f_2(\omega) = \int_\tau^\infty e^{i\omega t} dt = \lim_{\beta \rightarrow 0} \int_\tau^\infty e^{i\omega t} e^{-\beta t} dt \quad (\text{B.7})$$

$$f_2(\omega) = \left[\frac{e^{i\omega t - \beta t}}{i\omega - \beta} \right]_{\tau}^{\infty} = \frac{e^{i\omega\infty - \beta\infty}}{i\omega - \beta} - \frac{e^{i\omega\tau - \beta\tau}}{i\omega - \beta} \quad (\text{B.8})$$

On considère $\lim_{\beta \rightarrow 0} f_2(\omega)$:

$$f_2(\omega) = \frac{e^{i\omega\infty - 0\infty}}{i\omega - 0} - \frac{e^{i\omega\tau - 0\tau}}{i\omega - 0} \quad (\text{B.9})$$

$$f_2(\omega) = -\frac{e^{i\omega\tau}}{i\omega} \quad (\text{B.10})$$

Résolution de $F(\omega)$:

$$F(\omega) = \frac{e^{i\omega\tau}}{i\omega} + \frac{e^{i\omega\tau}}{\tau\omega^2} - \frac{1}{\tau\omega^2} - \frac{e^{i\omega\tau}}{i\omega} \quad (\text{B.11})$$

$$F(\omega) = \frac{e^{i\omega\tau} - 1}{i\omega^2} \quad (\text{B.12})$$

Calcul du signal de sortie $g(t)$

$$g(t) = \int_{\lim 1}^{\lim 2} \frac{df(x)}{dx} A e^{-\alpha(t-x)} dx \quad (\text{B.13})$$

Avec :

$$g(t) = \frac{df(x)}{dx} = \frac{1}{\tau} \quad (\text{B.14})$$

On obtient :

$$g(t) = \int_{\lim 1}^{\lim 2} \frac{A}{\tau} e^{-\alpha(t-x)} dx \quad (\text{B.15})$$

$$g(t) = \int_{\lim 1}^{\lim 2} \frac{A}{\tau} e^{-\alpha t} e^{\alpha x} dx \quad (\text{B.16})$$

$$g(t) = \left[\frac{A}{\alpha\tau} e^{-\alpha t} e^{\alpha x} \right]_{\lim 1}^{\lim 2} \quad (\text{B.17})$$

Pour $t > \tau$:

$$g(t) = \left[\frac{A}{\alpha\tau} e^{-\alpha t} e^{\alpha x} \right]_0^t \quad (\text{B.18})$$

$$g(t) = \frac{A}{\alpha\tau} e^{-\alpha t} e^{\alpha t} - \left(\frac{A}{\alpha\tau} e^{-\alpha t} e^{\alpha 0} \right) \quad (\text{B.19})$$

$$g(t) = \frac{A}{\alpha\tau} - \frac{A}{\alpha\tau} e^{-\alpha t} \quad (\text{B.20})$$

$$g(t) = \frac{A}{\alpha\tau} (1 - e^{-\alpha t}) \quad (\text{B.21})$$

Pour $t < \tau$:

$$g(t) = \left[\frac{A}{\alpha\tau} e^{-\alpha t} e^{\alpha x} \right]_0^\tau \quad (\text{B.22})$$

$$g(t) = \frac{A}{\alpha\tau} e^{-\alpha t} e^{\alpha\tau} - \left(\frac{A}{\alpha\tau} e^{-\alpha t} e^{\alpha 0} \right) \quad (\text{B.23})$$

$$g(t) = \frac{A}{\alpha\tau} e^{-\alpha t} e^{\alpha\tau} - \frac{A}{\alpha\tau} e^{-\alpha t} \quad (\text{B.24})$$

$$g(t) = \frac{A}{\alpha\tau} e^{-\alpha t} (e^{\alpha\tau} - 1) \quad (\text{B.25})$$

Annexe C

Hydrophone calibration at very low frequencies

Short Note

Hydrophone Calibration at Very Low Frequencies

by Cécile Joubert,^{*} Guust Nolet, Alexey Sukhovich, Anthony Oge,[†]
Jean-François Argentino, and Yann Hello

Abstract We propose a new method to study the response of a hydrophone at very low frequencies. In our method, the hydrophone is placed in a calibration chamber filled with water and, by instantaneously changing the water height, an abrupt pressure increase of about 1000 Pa is produced. The pressure variation mathematically corresponds to an input signal close to a step function. The response is recorded after filtering and digitizing so that we obtain the response of the complete system.

We also report on the development of an automatic method to determine the number of poles and zeros and their values that describe the observed response. We apply our method to the RAFOS II hydrophone, used on the Mobile Earthquake Recorder in Marine Areas by Independent Divers (MERMAID) floats. As an illustration of the method, an instrumental response in terms of poles and zeros is used to correct seismograms from the 7 April 2014 (M_w 4.8) Barcelonnette earthquake, recorded by three MERMAIDs deployed in the Mediterranean Sea, and to express the observed signals in pascals.

Introduction

Knowing the instrument response is important in quantitative seismology. Recently, hydrophones mounted on oceanographic Mobile Earthquake Recorder in Marine Areas by Independent Divers (MERMAID) floats, cruising at depths down to 2000 m in the Mediterranean Sea and Indian Ocean, have begun to record P waves from teleseismic and local earthquakes. The MERMAID float was developed to record teleseismic arrival times from strong earthquakes and to improve the knowledge of the dynamics of the mantle, more specifically by imaging the hotspot-rich mantle in the southern hemisphere, where the lack of land-based seismic stations results in poorly resolved global tomographic models (Simons *et al.*, 2006, 2009; Hello *et al.*, 2011). MERMAIDs have also demonstrated the ability to record weak local and regional events. As an example, Figure 1 shows the P phases recorded by three MERMAIDs of an earthquake that occurred on 7 April 2014 in Barcelonnette (France), with a magnitude of M_w 4.8. Global Positioning System positions of the floats that detected this earthquake are shown in Figure 2 (float position is determined after it surfaces to transmit the recording).

To correlate P arrivals in different instruments, or simply to estimate the amplitude correctly, it is necessary to correct

for the instrument response. It is challenging to calibrate hydrophones at such very low frequencies (< 2 Hz) (Giangreco, 1997). Various methodologies, such as reciprocity or substitution (Bobber, 1988; Smith and Bacon, 1990; Radulescu *et al.*, 2003; Koch and Wilkens, 2004; Veledar, 2009), have been proposed for the kilohertz and megahertz frequency range but few for very low frequencies. Methodologies developed by Levin (1973) and McEachern (1984) propose a dynamic calibration with a hydrophone displacement in a pressure field, whereas Golenkov and Pavlov (1972) and Zalesak (1999) propose a static one, in which the pressure itself is variable. In the Levin (1973) method, a hydrophone is placed along an inflexible vertical axis that is connected to a wheel and a motor. The wheel rotation leads to a vertical oscillation motion of the hydrophone in water, and the signal is recorded by a voltmeter. In the McEachern (1984) method, a hydrophone to be calibrated, as well as a reference hydrophone, are connected to a voltmeter and fixed along a rocker arm, which is also connected to a motor. The motor rotation leads to a vertical oscillation motion of the hydrophones, and the recorded amplitudes are compared. Golenkov and Pavlov (1972) propose a similar method in which a hydrophone is immersed in a water tank connected to a vibrating chamber by means of a flexible cable. This open vibrating chamber is filled with water. The chamber vibrations are transmitted to the hydrophone, and the recorded signals are studied. The Zalesak (1999) method is an extension of the reciprocity method at

^{*}Now at Université Nice Sophia Antipolis, CNRS, IRD, Observatoire de la Côte d'Azur, Géoazur UMR 7329, 250 rue Albert Einstein, Sophia Antipolis 06560 Valbonne, France.

[†]Now at ONIRIS, CNRS, GEPEA UMR 6144, 44322 Nantes, France.

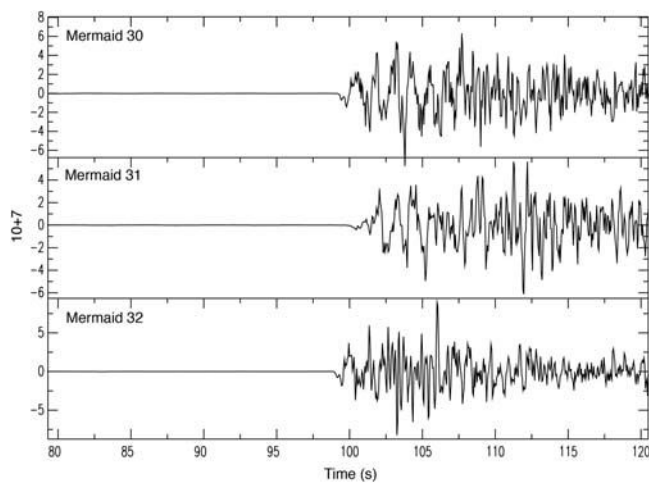


Figure 1. Raw digitizer output of the Barcelonnette earthquake (M_w 4.8) recorded by three Mobile Earthquake Recorder in Marine Areas by Independent Divers (MERMAIDs) on 7 April 2014. The time axis is in seconds and begins at 19:25:45 UTC. The amplitude axis is in counts.

high frequencies. The hydrophone to be calibrated, a projector, and a transducer are placed in a closed calibration chamber. The hydrophone response is determined by measuring the electrical impedance of each pair of transducers.

In this study, we test a new method for hydrophone calibration at very low frequencies. To study the hydrophone response, the hydrophone is subjected to an abrupt pressure variation of about 1000 Pa, which is close to the saturation of the electronics but still linear, and the output signal is analyzed in terms of poles and zeros. Rather than measuring the response of the hydrophone itself in volts, we measure the response of the complete system, including electronics, filtering, and digitizing stages in counts, which enables us to correct the digital signals for the instrument response. In our method, the hydrophone is rigidly fixed in a calibration chamber filled with water. The pressure variation is created by opening a solenoid valve positioned between the chamber and a vertical tube that is also filled with water (Fig. 3). The water level in a tube (10 cm in our case) controls the amount of the induced pressure variation. The sudden pressure increase generates an input signal close to a step function, though we introduced a short, linear rise of duration t_r (equation 3). We applied our method to calibrate a RAFOS II hydrophone, developed by Teledyne Benthos and used in the MERMAID. For teleseismic P waves, the frequency band of interest is between 0.01 and about 2 Hz. The RAFOS II frequency response is flat between 5 Hz and 10 kHz, but no factory data are supplied for frequencies under 5 Hz.

Experimental Details

As shown in Figure 3, the hydrophone is attached to the upper part of a cylindrical calibration chamber. The calibration chamber is carefully filled with water, and we make sure that no air bubbles are present. The impermeability at the

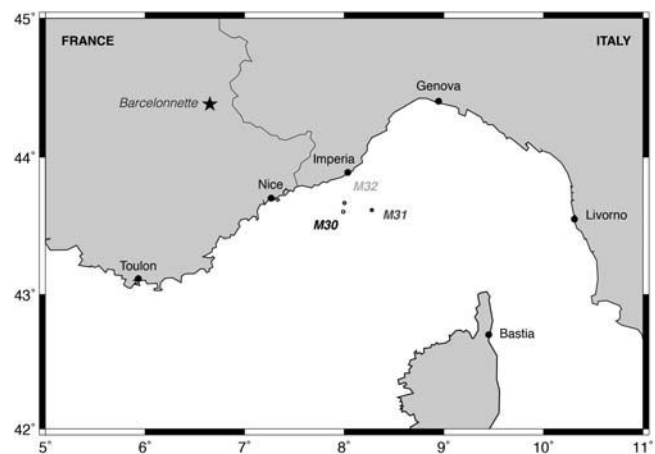


Figure 2. Locations of the three MERMAID floats (M30, M31, and M32) during their transmission of the Barcelonnette earthquake records.

base of the hydrophone is accomplished through an O-ring. The upper part of the chamber is also sealed to the lower part through a circular O-ring and three screws at 120° from each other, which ensure the chamber is completely sealed.

To the upper part of the chamber, we mounted a solenoid valve, which controls the contact between the water in the calibration chamber and an additional water column placed above the solenoid valve. The valve is connected to a stable power supply. Using a water density of $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$, a local gravity acceleration $g = 9.804 \text{ m/s}^2$, and $\Delta h = 0.1 \text{ m}$, we obtain a pressure increase of $\Delta P = 978.4 \text{ Pa}$, for a water column of 10 cm. When we open the valve, the two fluids come into direct contact, which creates a pressure increase detected by the hydrophone. To independently monitor the pressure increase time, a pressure sensor is placed at the base of the chamber (Fig. 3, lower circle). This is used to measure the short time ($t_r < 1 \text{ s}$) it takes for the pressure increase to establish itself. This second sensor, however, was too noisy to be used for direct calibration.

Between the solenoid valve and the upper part of the calibration chamber, a purge allows us to flush out the water column before repeating the experiment.

The hydrophone is connected to the data-acquisition card of the MERMAID float by a coaxial cable. The acquisition frequency extends from 0.1 to 10 Hz with a band-pass filter integrated in the electronic card, and the acquisition sampling frequency of 40 Hz is the same as used in the MERMAID.

Ensuring reproducibility of signals is an important point, and several difficulties had to be overcome during the method development. A strict protocol was set in place, and a quiet environment is required to limit signal disturbances. At $t = 0 \text{ s}$, the data acquisition begins, and the chronometer starts. At $t = 1 \text{ min}$, we open the solenoid valve. At $t = 2 \text{ min}$, the acquisition stops; and, before $t = 3 \text{ min}$, we flush out and adjust the water level in the additional water column for the next experiment. The water level adjustment needs to be precise to produce the desired pressure increase. After $t = 6 \text{ min}$, required to

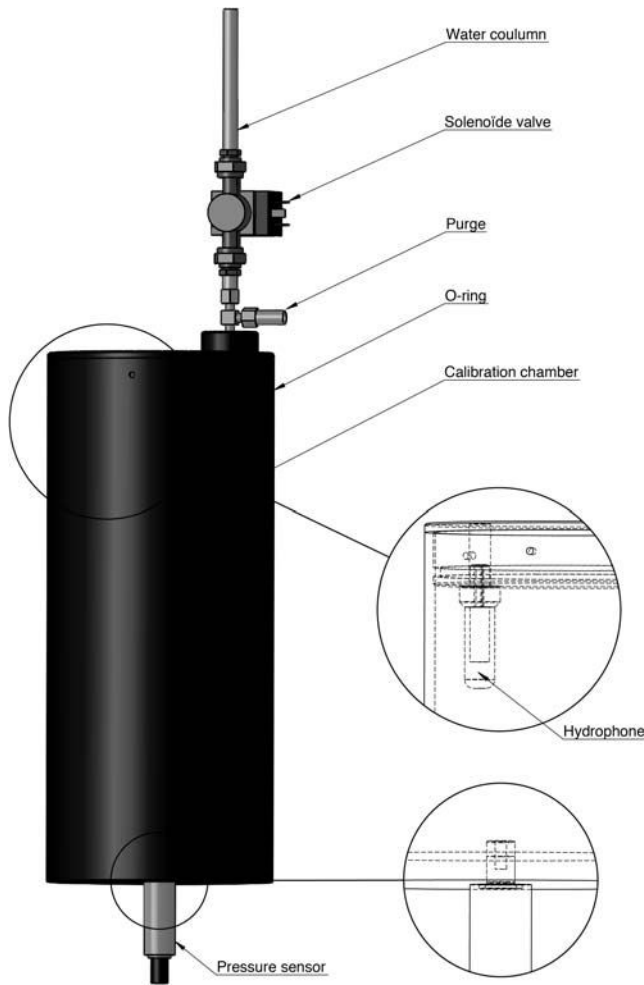


Figure 3. Mechanical setup of the calibration method. The upper and lower enlargements show the hydrophone and the second pressure sensor assemblies, respectively.

allow the hydrophone and the high-pass filter to stabilize, another cycle can begin. Acquisitions took place on several days during May 2014 at different times of the day and also under different temperature conditions to confirm the reproducibility of signals. The measured response has a mean maximum amplitude of $1.54 \pm 0.13 \cdot 10^8$ counts. Experiments with a maximum amplitude beyond twice the standard deviation were rejected. A total of 21 response curves were accepted.

Poles and Zeros Determination

Wielandt (2012) and Ringler *et al.* (2012) describe methods to determine the poles and zeros of an instrument from an impulse response. Because we were unable to find a simple algorithm to get the poles and zeros from an observed response to a step function in the seismological literature, we describe the interactive method we developed to determine the poles and zeros, which is the basis of the program *polezero*. The program is written in FORTRAN 90 and uses Generic Mapping Tools for plotting (Wessel and Smith, 1991).

With the Fourier sign convention

$$H(\omega) = \int_0^\infty h(t) \exp(i\omega t) dt, \quad (1)$$

the output spectrum $H(\omega)$ is approximated by n_p poles and n_z zeros as

$$H(\omega) = A_0 \frac{(i\omega - z_1)(i\omega - z_2) \dots (i\omega - z_{n_z})}{(i\omega - p_1)(i\omega - p_2) \dots (i\omega - p_{n_p})}. \quad (2)$$

The spectrum $H(\omega)$ is Fourier transformed to predict the step response $h(t)$ in the time domain, and the squared misfit with the observed signal $J = \int [h(t) - h_{\text{obs}}(t)]^2 dt$ is minimized as a function of A_0 , as well as the poles p_i and zeros z_i .

We give the theoretical development for a step response. For the impulse response, an extra zero $z_{n_z+1} = 0$ needs to be added.

In the first experiments, we noticed the assumption of a pure step function input led to an underestimate of the response for the highest frequencies; we therefore decided to measure the rise time to a maximum amplitude using the second sensor connected to an oscilloscope, and we allow the influence of a rise time t_r of the pressure increase (Fig. 4). For a pure step input function of amplitude P_0 , $F(\omega) = iP_0/\omega$. Incorporating a linear rise over time t_r , the input spectrum becomes

$$\begin{aligned} F(\omega) &= P_0 \int_0^{t_r} \frac{t}{\tau} \exp(i\omega t) dt + P_0 \int_{t_r}^\infty \exp(i\omega t) dt \\ &= P_0 \frac{\exp(i\omega t_r) - 1}{\omega^2 t_r}. \end{aligned} \quad (3)$$

The determination of the poles and zeros, as well as their number, is a highly nonlinear process. It is therefore important to have an acceptable starting guess for the response in terms of poles and zeros. In addition, one is often unsure what the optimal number of poles and zeros might be. To find a good starting set of poles and zeros, we distinguish two cases for a first approximation of the response to a pure step function, neglecting t_r : the underdamped case uses

$$h(t) = (A + Bt) \exp(-\alpha t), \quad (4)$$

and the critical or overdamped case uses

$$h(t) = A \exp(-\alpha t). \quad (5)$$

In the underdamped case (Fig. 4, lower curve), we parametrize a stack of recorded signals in terms of a simplified response with an overshoot, to find a first starting guess for one zero and two poles:

$$h(t) = (A + Bt) \exp(-\alpha t), \quad (6)$$

of which the Fourier transform is

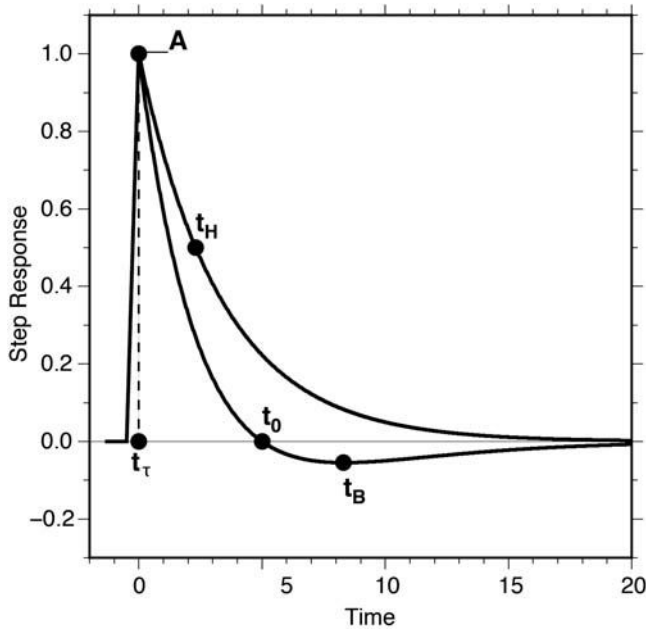


Figure 4. Parameters of the two responses considered in the article. The underdamped response is described by a maximum amplitude A ; the time of the first zero crossing (t_0) and minimum amplitude (t_B) are included. The overdamped response is described by a maximum amplitude A and the t_H at which the amplitude of the response decreases to the value of $A/2$. In both cases, we also take into account the time of the pressure increase t_r (measured independently by the second pressure sensor, in the underdamped case).

$$H(\omega) = -A \frac{i\omega - \alpha - B/A}{(i\omega - \alpha)^2}, \quad (7)$$

from which we recognize one real zero at $i\omega = \alpha + B/A$ and two real poles at α .

Figure 4 shows the important parameters used for the estimation of the first set of poles and zeros, assuming a pure step function input. We estimate A by measuring the maximum of the response. An estimate for B is subsequently found from the first zero crossing:

$$B = -\frac{A}{t_0}. \quad (8)$$

The time of the minimum amplitude in the response gives an estimate of α . Setting the derivative of $h(t)$ to zero gives

$$\alpha = \frac{B}{A + Bt_B}, \quad (9)$$

in which t_B is defined by $h'(t_B) = 0$. The two poles and one zero defined by these estimates of A , B , and α are used as starting values for the nonlinear optimization.

Because we are not sending a pure step input function, we allow for the influence of a rise time t_r for the pressure increase. t_r is read from the second pressure sensor, which is sampled at very high frequency on the oscilloscope.

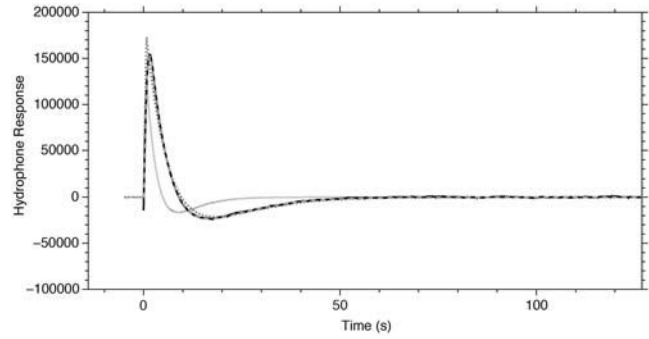


Figure 5. The step response of the MERMAID system (black curve) and the final fit for four poles and three zeros (dashed gray curve). The starting fit (using equation 7, with two poles and one zero) and the result of the first iteration are given by the light gray and the dotted gray curves, respectively.

If the system is critically damped or overdamped and does not show an overshoot (Fig. 4, upper curve), a simple exponential decay with $B = 0$ is assumed, but we maintain $n_p = 2$ and $n_z = 1$ even though in that case one pole and one zero are equal to α and could be divided out; instead, we allow the first iteration of optimization to change them into values that are different from each other. In this case, we estimate the starting value α from the half time t_H in which the response has decreased to $A/2$:

$$\alpha = \frac{-\ln 0.5}{t_H} = \frac{0.693}{t_H}. \quad (10)$$

Once we obtain the optimum fit for the starting configuration of two poles and one zero (both real), we may proceed by adding a pair of one complex zero and one complex pole that are each identical to $(1 + i)$. Because these divide out, the starting fit of the next iteration is the same as the one with fewer poles and zeros. In the case of complex poles, the requirement that the response is real forces the program to add their complex conjugates as well, but these are not independent from their counterpart and thus do not add to the number of parameters in the optimization. In each iteration, we thus increase the number of variables to optimize by four (two real and two imaginary components). We used Powell's method (Press *et al.*, 1992) to converge and determine the number of additional poles and zeros by trial and error. Though somewhat slow, Powell's method was found to be much more robust than a gradient search. In our experience, it always leads to a satisfactory fit, comparable with the noise, in the time domain.

Results

We determined the poles and zeros for the RAFOS II hydrophone in series with the MERMAID electronic card. We are in the underdamped case. We average the 21 response curves to give the black curve in Figure 5. The response is defined by a maximum amplitude of $A = 1.5410^8$ counts at $t_r = 0.73$ s, a zero crossing time of $t_0 = 4.51$ s, and a time

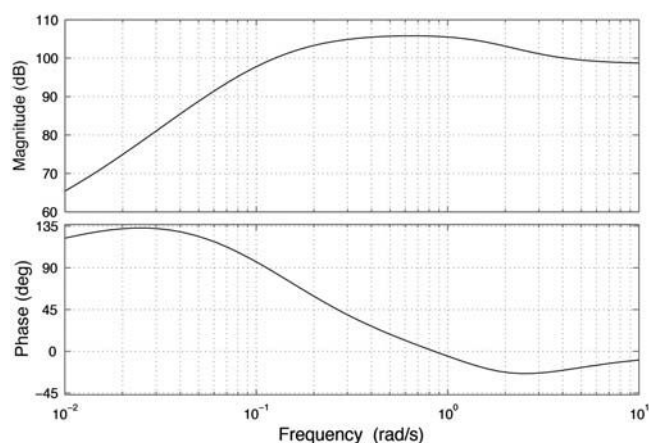


Figure 6. Bode diagram for the poles, zeros, and constant of the studied system.

at minimum signal of $t_B = 8.52$ s. After three iterations, we obtain a misfit of 0.002, indicated by the thick gray dashed line in Figure 5. The associated poles and zeros for the impulse response (with extra zero added) are listed in Table 1 and illustrated with a Bode diagram in Figure 6 (following the notation and using sign conventions for use with the Seismic Analysis Code, the first and second columns, respectively, represent the real and imaginary parts of the poles and zeros expressed in radians per second and A_0 in counts/Pa). If another pole and zero pair is added, the misfit does not change the third decimal.

The value of t_τ is determined by the second sensor with a precision better than 0.1 s. The accuracy of the poles and zeros estimates was tested by computing them for three values of t_τ . Our best estimate (from 21 experiments) yields $t_\tau = 0.73 \pm 0.09$ s. In Figure 7, we illustrate the instrument correction for the Barcelonnette earthquake recorded by MERMAIDs (Fig. 1). The variability between t_τ values induces a weak influence of t_τ (black curve $t_\tau = 0.73$ s, dashed black curve $t_\tau = 0.65$ s, and dashed gray curve $t_\tau = 0.80$ s). Although the response at high frequencies is affected by the values of t_τ , the actual effect on the seismogram is minor, even for this case of a regional earthquake with frequencies in excess of 2 Hz. Thus, the Barcelonnette earthquake produced a maximum pressure increase of about 500 Pa on MERMAID float records.

Table 1

Poles and Zeros for the Impulse Response Determined for the RAFOS II Hydrophone with MERMAID Electronic Card in the Undamped Case

Poles 4 (rad/s)		Zeros 4 (rad/s)	
−0.111545250	0.00000000	0.00000000	0.00000000
−0.152957797	0.00000000	−0.011453878	0.00000000
−1.40562248	−0.882738054	−2.36022949	−1.17094541
−1.40562248	0.882738054	−2.36022949	1.17094541

Constant $A_0 = 0.8380073 \times 10^{05}$ counts/Pa.

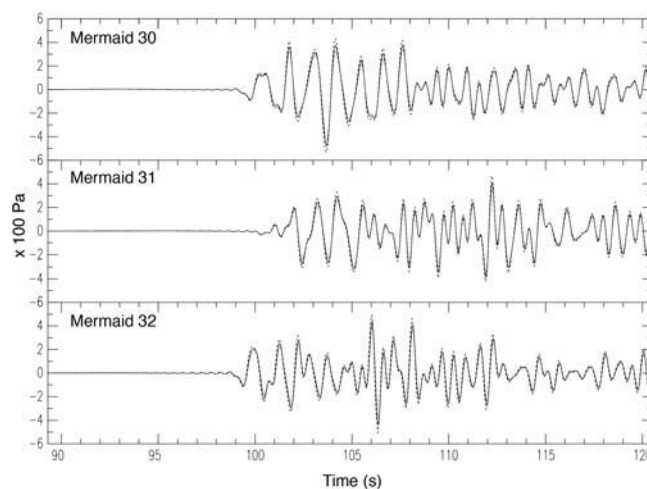


Figure 7. Instrument-corrected MERMAID records of the Barcelonnette earthquake for different values of t_τ : the dashed black signal for $t_\tau = 0.65$ s, the black signal for $t_\tau = 0.73$ s, and the dotted gray signal for $t_\tau = 0.80$ s.

Conclusions

In this study, we propose a new hydrophone calibration method that does not require a reference hydrophone. It allows correction of the instrument response using a small number of poles and zeros. We applied the method to MERMAID records of the Barcelonnette earthquake (M_w 4.8), which occurred on 7 April 2014.

The method developed here offers a way to estimate hydrophone responses at low frequencies. It is important to respect the experimental protocol described above to ensure reproducibility of signals. The pressure increase is transmitted to the calibration chamber in a short (< 1 s) but finite time t_τ . This results in an input signal somewhat different from a pure step function. This delay time was measured by a second pressure sensor and was estimated to be about 0.73 s. The reasons for this particular value are not clear for the moment because neither the response time of the solenoid valve (35 ms) nor inertial effects would seem to be able to cause such a relatively large delay. However, it is important to take the delay into account because otherwise the response is clearly underestimated at high frequencies.

The program *polezero* can be freely downloaded (see [Data and Resources](#)). The download includes a user guide, explaining step by step the program functioning for the two considered cases: for underdamped and critical or overdamped signals (two input signals are provided as well).

Data and Resources

The poles and zeros software (*polezero*) is available at <https://www.geoazur.fr/GLOBALSEIS/Soft.html> (last accessed March 2015). Mobile Earthquake Recorder in Marine Areas by Independent Diver (MERMAID) data are collected by Géoazur and available at <https://www.geoazur.fr/GLOBALSEIS/Data.html> (last accessed March 2015).

Acknowledgments

We thank the reviewers and Associate Editor Eric Chael for their fruitful comments that helped improve this article. This work is supported by Osean and the Association Nationale de Recherche et Technique (ANRT). G.N. and A.S. were supported by the European Research Council (ERC, Advanced Grant 226837). A.S. also received financial support from a Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) Chair of Excellence award.

References

- Bobber, R. J. (1988). *Underwater Electroacoustic Measurements*, Peninsula Press, Los Altos, California.
- Giangreco, C. (1997). *Mesures acoustiques appliquées aux antennes sonar*, Ed., Tech. & Doc./Lavoisier (in French).
- Golenkov, A. N., and L. E. Pavlov (1972). Method of calibrating infrasonic hydrophones, Patent: AD 770 520.
- Hello, Y., A. Ogé, A. Sukhovich, and G. Nolet (2011). Modern mermaids: New floats image the deep Earth, *Eos Trans. AGU* **92**, 337–338.
- Koch, C., and V. Wilkens (2004). Phase calibration of hydrophones: Heterodyne time-delay spectrometry and broadband pulse technique an optical reference hydrophone, *J. Phys. Conf.* **1**, 14–19.
- Levin, P. A. (1973). *Calibration of Hydrophones*, Bruël and Kjaer.
- McEachern, J. F. (1984). Very low frequency hydrophone calibration, Patent: 4 441 173.
- Press, W. H., F. B. P. Teukolsky, and W. T. Vetterling (1992). *Numerical Recipes*, Second Ed., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Radulescu, G., E. A. Lewin, P. J. Wójcik, and A. Nowicki (2003). Calibration of ultrasonic hydrophone probes up to 100 MHz using time gating frequency analysis and finite amplitude waves, *Ultrasonics* **41**, 247–254.
- Ringler, A. T., C. R. Hutt, R. Aster, H. Bolton, L. S. D. Gee, and T. Stom (2012). Estimating pole-zero errors in GSN-IRIS/USGS network calibration metadata, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **102**, no. 2, 836–841.
- Simons, F. J., G. Nolet, J. M. Babcock, R. E. Davis, and J. A. Orcutt (2006). A future for drifting seismic networks, *Eos Trans. AGU* **87**, 31–87.
- Simons, F. J., G. Nolet, P. Georgief, J. M. Babcock, L. A. Regier, and R. E. Davis (2009). On the potential of recording earthquakes for global seismic tomography by low-cost autonomous instruments in the oceans, *J. Geophys. Res.* **114**, B05307.
- Smith, R. A., and D. R. Bacon (1990). A multiple-frequency hydrophone calibration technique, *J. Acoust. Soc. Am.* **87**, no. 5, 2231–2243.
- Veledar, O. (2009). Hydrophone-based calibrator for seawater detection of UHE neutrinos, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **607**.
- Wessel, P., and W. H. F. Smith (1991). Free software helps map and display data, *Eos Trans. AGU* **72**, 441–446.
- Wielandt, E. (2012). Seismometer calibration with program CALEX, in P. Bormann (Editor), *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*, Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ), Postdam, Germany, 1–3.
- Zalesak, J. F. (1999). Transfer coupler reciprocity: A new low-frequency coupler-reciprocity technique for the absolute calibration of field hydrophones under full environmental conditions, *J. Acoust. Soc. Am.* **4**, no. 105, 2342–2349.

Osean, ZAE La Bayette
83220 Le Pradet
France
(C.J., J.-F.A.)

Université Nice Sophia Antipolis
CNRS, IRD, Observatoire de la Côte d'Azur
Géoazur UMR 7329
250 rue Albert Einstein
Sophia Antipolis 06560 Valbonne, France
(G.N., A.O., Y.H.)

UMR 6538 Domaines Océaniques
Université Européenne de Bretagne
Université de Bretagne Occidentale
CNRS, IUEM
29280 Plouzané, France
(A.S.)

Manuscript received 28 August 2014;
Published Online 12 May 2015

Annexe D

Programme «polezero»

Le programme «polezero» est disponible en téléchargement libre sur le site : <https://geoazur.fr/GLOBALSEIS/Soft.html>. Il est programmé en langage Fortran 90 et utilise GMT (Wessel et Smith, 1991) pour l’affichage des résultats.

Le programme considère les deux cas de signaux potentiels en fonction de leurs amortissements, critique ou pseudopériodique et suit l’organigramme exposé en figure D.1.

Le programme demande à l’utilisateur s’il souhaite utiliser GMT pour l’affichage des graphiques, une estimation de temps t_τ nécessaire à la mise en place de la fonction de Heaviside et s’il s’agit d’un premier test. Si ce n’est pas le cas le programme cherche le fichier «*inpz*» d’un précédent test et utilise les valeurs des pôles et zéros comme point de départ pour une nouvelle optimisation.

Dans le cas d’un nouveau test, les deux tendances de signaux peuvent être considérées (cas périodique et pseudopériodique). Dans les deux cas, l’utilisateur doit renseigner les caractéristiques de la tendance des signaux. Dans le cas critique, les valeurs de l’amplitude A du signal à t_τ et t_τ sont demandées. Dans le cas pseudopériodique, les valeurs de l’amplitude A , t_0 le temps pour lequel la courbe $g(t)=0$ et t_B le temps d’inflexion minimum de la réponse, sont demandées. Dans les deux cas, les valeurs des paramètres sont utilisées comme point de départ pour orienter la convergence de la recherche des pôles et zéros.

Le programme demande ensuite le fichier contenant les données brutes «*data.xy*», l’amplitude de la fonction de Heaviside qui est appliquée en entrée et renvoie en sortie le fichier «*d.xy*» contenant les données normalisées à 1 Pa. Le fichier contenant les données brutes doit être conçu de façon à ce que les deux premières lignes correspondent respectivement au nombre d’échantillons du signal (*nsm*) et à la fréquence d’échantillonnage en temps (*dt*), comme illustré ci-dessous.

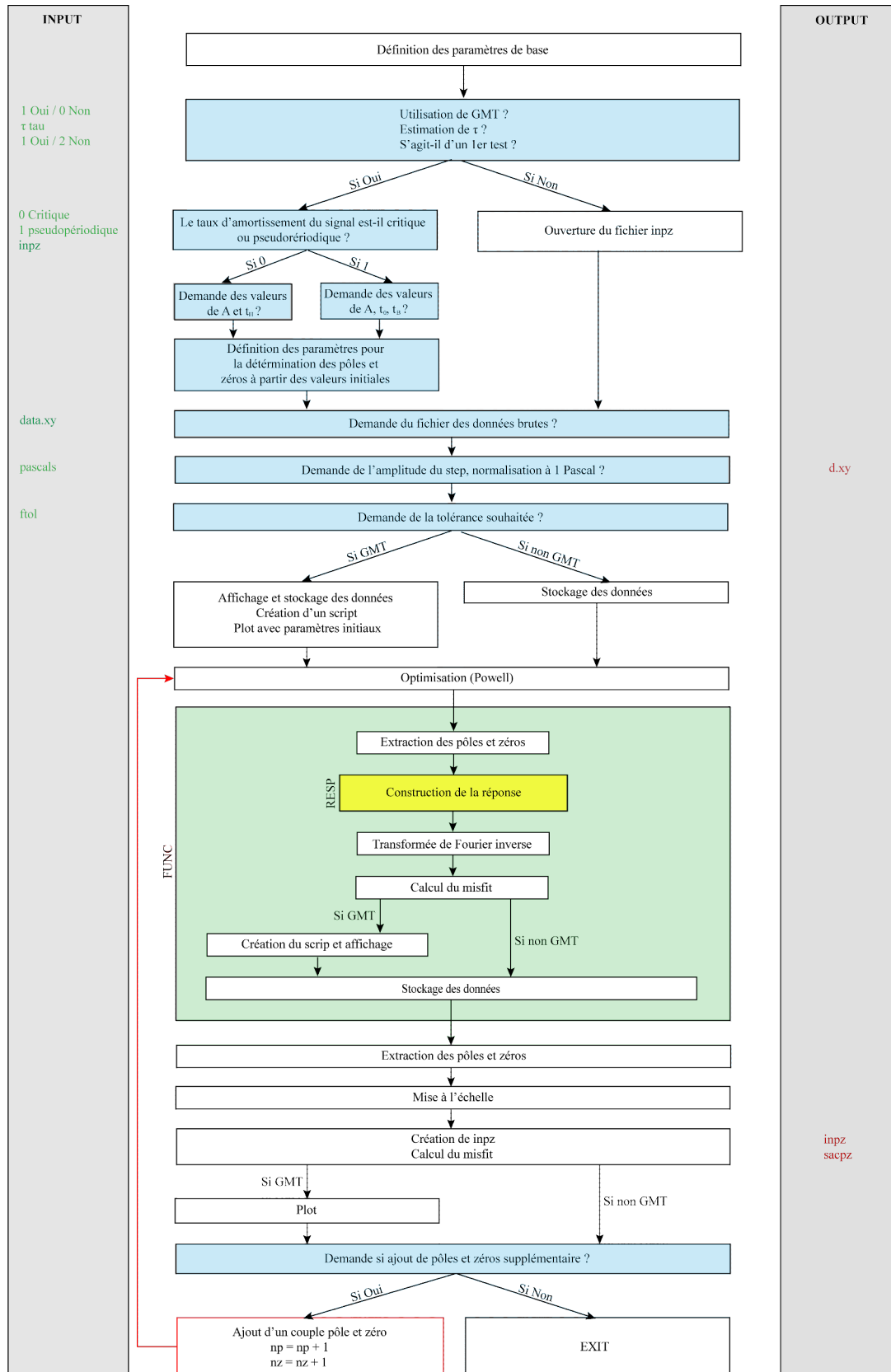


FIGURE D.1 – Organigramme du programme «polezero» de détermination des pôles et zéros d'un système.

La tolérance souhaitée est également demandée.

Exemple de fichier «Data»

```
2819
0.05
-1.4339415e+07 -2.0535045e+06 9.7761499e+06 2.0716494e+07 3.1110495e+07
4.0995563e+07 5.0474303e+07 5.9588334e+07 6.8276719e+07 7.6533751e+07
8.4376713e+07 9.1730022e+07 9.8578335e+07 ...
```

Si GMT est utilisé, le programme affiche la courbe obtenue à partir des paramètres initiaux (figure D.2.a). La convergence est réalisée par la méthode de Powell (Press *et al.*, 1992). Une fois l'optimisation terminée la fonction «*func*» extrait les pôles et zéros, la réponse est alors construite suivant l'équation 2.50, puis le programme applique une transformée de Fourier inverse pour revenir au domaine temporel, et calcule le résidu. Si GMT est utilisé, un programme est fabriqué et des données des pôles et zéros sont stockées. En sortie de la fonction «*func*», les pôles et zéros sont extraits et stockés dans les fichiers «*inpz*» et «*sacpz*». Le fichier «*inpz*» contient les valeurs des pôles et zéros qui peuvent servir à une nouvelle optimisation et le fichier «*sacpz*» contient la réponse impulsionnelle du système. Cette dernière peut être utilisée directement sous SAC à l'aide de la commande «*transfert*».

Exemple de fichier «inpz»

```
      3      2
-87277.6250
(0.102982759, 0.00000000) (0.165181488, 0.00000000) (1.42801642, 0.820259333)
(1.07844425E-02, 0.00000000) (2.31526613, 1.13230836)
```

Exemple de fichier «sacpz»

```
POLES      4
-0.102982759      -0.00000000
-0.165181488      -0.00000000
-1.42801642      -0.820259333
-1.42801642       0.820259333
ZEROS      4
0.00000000      -0.00000000
-1.07844425E-02  -0.00000000
-2.31526613     -1.13230836
-2.31526613      1.13230836
CONSTANT 0.872776E+05
```

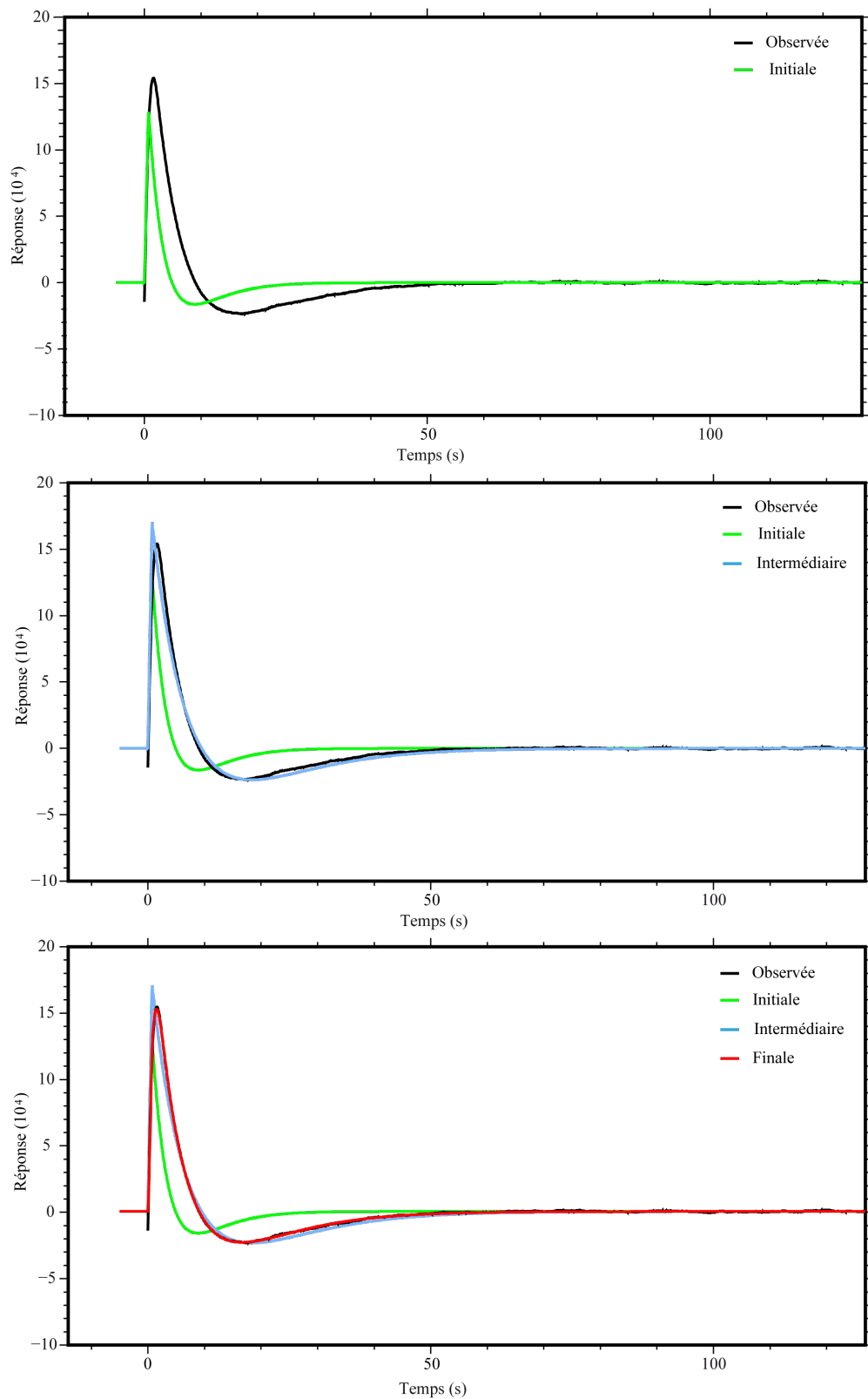


FIGURE D.2 – Résultats du programme «polezero». Sur le graphique (a) la courbe verte représente le point de départ de la recherche des pôles et zéros à partir d'un jeu initial d'un zéro et de deux pôles. La courbe noire représente les données observées par l'utilisateur. Le graphique (b) reprend les courbes précédentes en y ajoutant en bleu le résultat de l'optimisation. Le graphique (c) reprend les courbes précédentes et ajoute la courbe finale en rouge obtenue pour quatre pôles et trois zéros.

Si GMT est utilisé, un graphique avec le résultat de la nouvelle optimisation est affiché (figure D.2.b). Si le résultat est satisfaisant, l'utilisateur peut arrêter le processus. Le cas échéant un couple de pôles et zéros est ajouté et le programme recommence une optimisation de Powell jusqu'à obtenir le meilleur résultat (figure D.2.c). Dans le cas de l'ajout d'un couple pôles et zéros, les complexes conjugués sont également ajoutés, ce qui revient à ajouter quatre variables à l'optimisation.

Exemple d'optimisation dans le cas pseudopériodique

Un exemple d'utilisation du programme est disponible ci-dessous pour le cas d'un signal en amortissement pseudopériodique. Nous utilisons 21 courbes représentatives de la réponse du système à une fonction de Heaviside en intégrant l'action de t_τ . Ces expériences ont été réalisées le 16 mai 2014. La valeur de t_τ est obtenue par lecture du capteur de pression externe, ici nous considérons $t_\tau = 0,73$ s (exemple d'enregistrement en figure 2.22) et moyennée sur l'ensemble des 21 expériences.

Les valeurs de A , t_0 et t_B sont également obtenues à partir du signal moyen résultant des 21 expériences réalisées, représentées par la courbe noire sur la figure 2.27 ($A = 1,54 \times 10^8$ counts, $t_0 = 4,51$ s et $t_B = 8,52$ s). Le nombre d'échantillons de notre signal moyen est de $n_{smp} = 2819$ points et notre intervalle de temps entre deux points $dt = 0,05$ s.

Exemple d'utilisation du programme «polezero»

```
Use GMT plotting (1) or not (0)?
1
==== Important: the program pauses after every plot
==== until you quit ghostview
Give tau:
0.73
Is this a first run (1) or starting from file inpz (2)?
1
Critical damping (0) or negative overshoot (1)?
1
Give max amplitude A, time of zero crossing, and time of largest amplitude <0:
1.54e8 4.51 8.52
Give file with observed response:
average.xy
Give amplitude of input step function:
1000
Give tolerance (e.g. 0.0001):
0.0001
Initial misfit normalized to 1.0
Now optimizing...have patience
Relative misfit: 0.073
Add more poles/zeros (1) or stop (0)?
1
```



```
Now optimizing...have patience
Relative misfit: 0.002
Add more poles/zeroes (1) or stop (0)?
0
```

Un résultat satisfaisant est obtenu pour la configuration de quatre pôles et de trois zéros (un quatrième zéro est considéré à zéro) comme illustré par la courbe rouge en figure D.2.c, avec un résidu de 0,002, normalisé à partir du résidu obtenu lors de l'établissement de la courbe initiale. Les pôles et zéros associés sont listés dans les fichiers «*sacpz*» et «*inpz*».

La distribution des pôles et zéros est représentée en figure D.3.

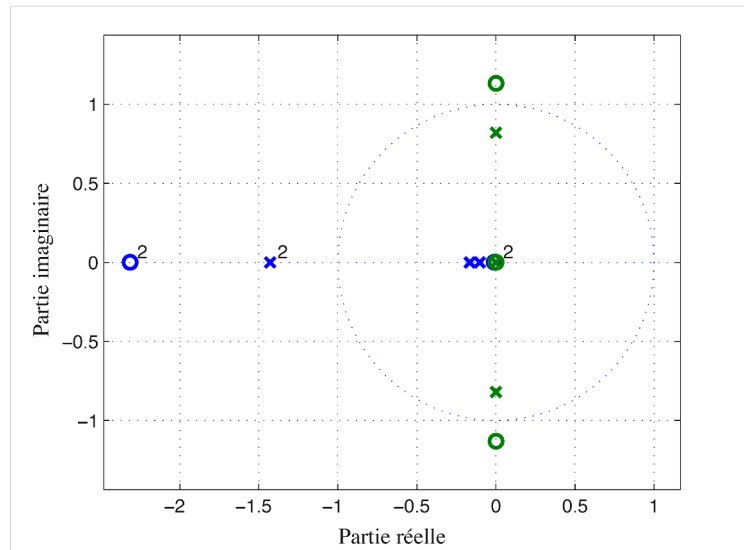


FIGURE D.3 – Graphique des pôles et zéros du système d'étude, réalisé à partir du fichier «*sacpz*».

La même opération a été effectuée à partir des données issues de la méthode de calibration dynamique d'hydrophone à basses fréquences (partie II du chapitre 2). Le programme «*polezero*» et son code d'utilisation associé sont disponible sur le site <https://geoazur.fr/GLOBALSEIS/Soft.html>.

Annexe E

Les étapes de l'inversion tomographique

L'inversion tomographique est divisée en six étapes principales, listées ci-dessous et illustrées en figure E.1. Les programmes et le manuel d'utilisation sont disponibles à l'adresse : <https://www.geoazur.fr/GLOBALSEIS/Soft.html>.

Etape 1 : préparation des données

Préparation du modèle de référence à une dimension

Afin de comparer nos temps d'arrivées, nous utilisons le modèle de référence IASP91 développé par [Kennett et Engdahl, 1991](#) pour l'étude des vitesses des ondes P et S , dans notre cas pour les ondes P . Les changements de vitesse associés au modèle sont illustrés en figure E.2. D'autres modèles peuvent également être utilisés tels que PREM¹ ([Dziewonski et Anderson, 1981](#)), ak135 ([Kennett et al., 1995](#)), PEM² ([Dziewonski et al., 1974](#)) ...

Préparation des données des lectures de phase

Cette étape correspond à la mise en forme des temps d'arrivées des ondes P , réalisée à partir des données des stations listées en partie II du chapitre 3, suivant le format requis par les programmes pour la résolution du problème inverse.

Le programme prend comme fichiers d'entrées :

- Le catalogue des événements sélectionnés qui contient les informations sur les dates, les heures, les latitudes, les longitudes et les profondeurs des séismes.

1. Preliminary Reference Earth Model
2. Parametric Earth Model

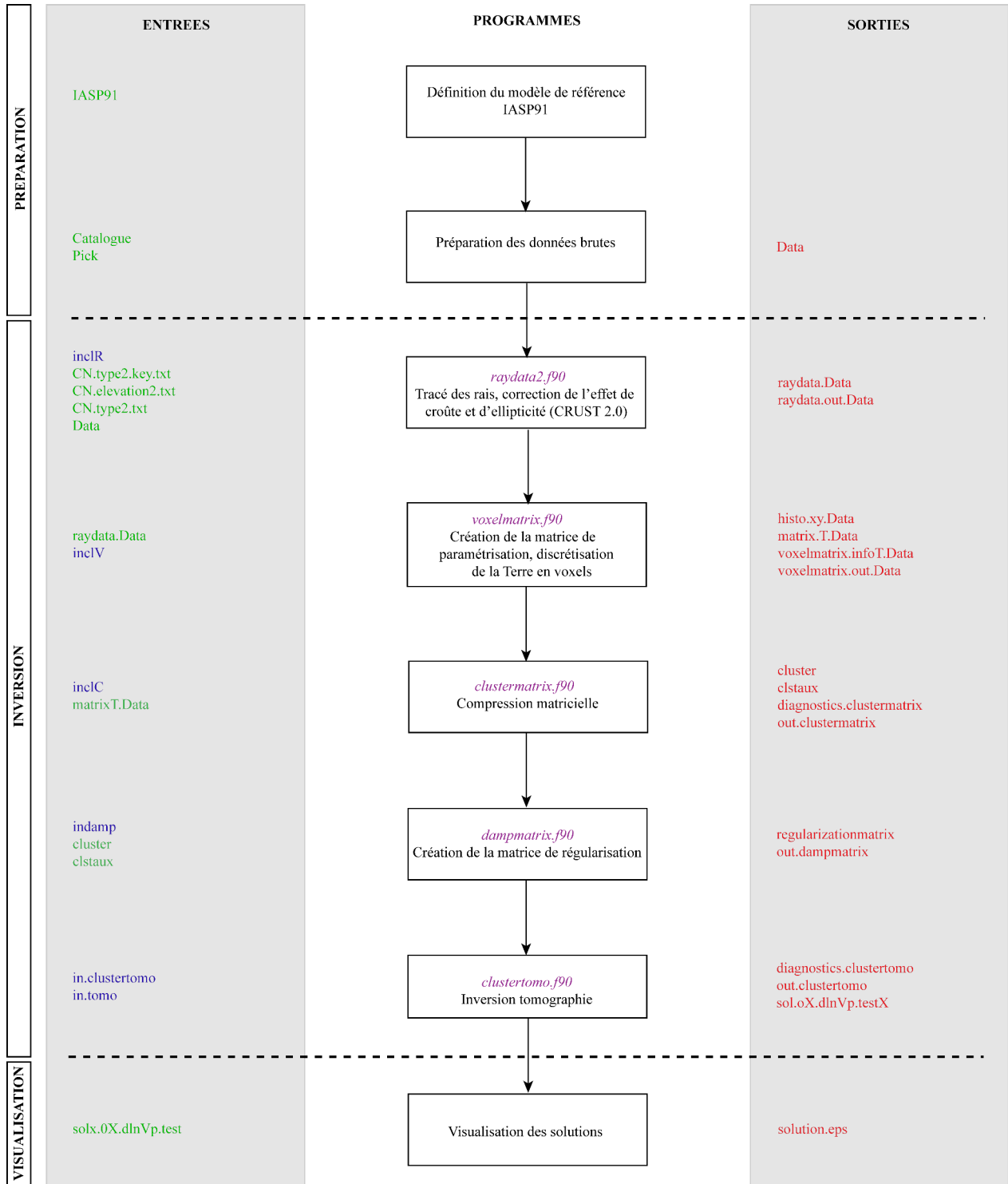


FIGURE E.1 – Schéma des étapes de l'inversion tomographique. Les fichiers d'entrées sont en vert et les fichiers de paramètres sont en bleu. Les fichiers de sorties «*.out*» et «*.info*» sont des fichiers systèmes, qui permettent de suivre le déroulement des différentes étapes.

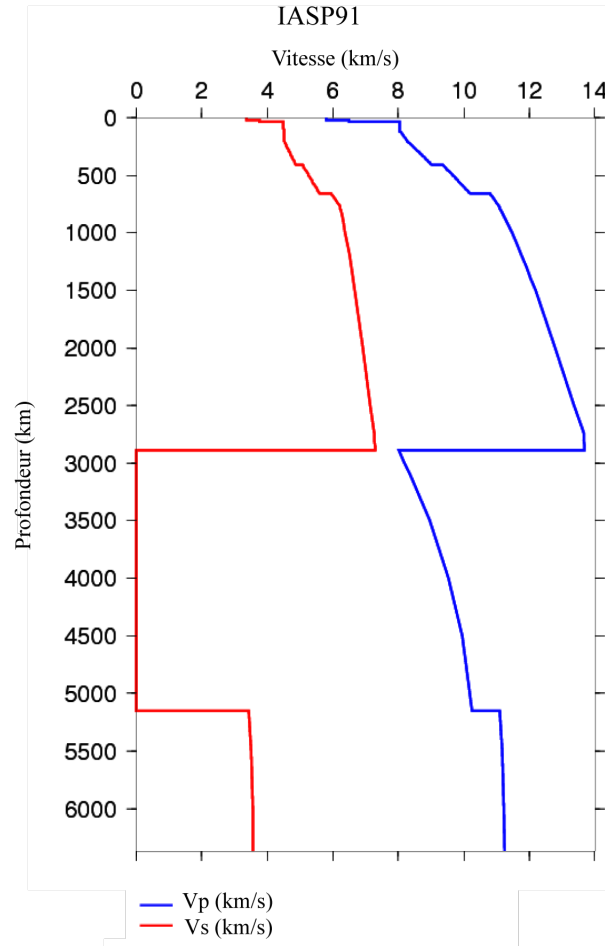


FIGURE E.2 – Modèle des vitesses des ondes P et S suivant le modèle IASP91, d'après [Kennett et Engdahl, 1991](#).

- Le fichier des positions des stations, leurs noms, latitudes, longitudes et profondeurs ou élévations.

Le programme renvoie un fichier de sortie structuré pour la résolution du problème inverse. Une illustration des informations relatives à un rai sismique est présentée en figure [E.3](#).

Étape 2 : correction de l'effet de croûte et de l'ellipticité (*raydata2.f90* dans figure [E.1](#))

Le programme «*raydata2.f90*» permet d'apporter des corrections de l'effet de croûte (prise en compte de la nature de la croûte et de son épaisseur) et de l'ellipticité de la Terre. Ces corrections sont réalisées grâce au modèle global de croûte **CRUST2.0** ([Bassin et al., 2000](#)).

Afin d'utiliser «*raydata2.f90*», les fichiers : «*CNtype2.txt*» et «*CNtype2_key.txt*» contenant le modèle global et «*CNelevation2.txt*» contenant les informations sur la bathymétrie et la topographie

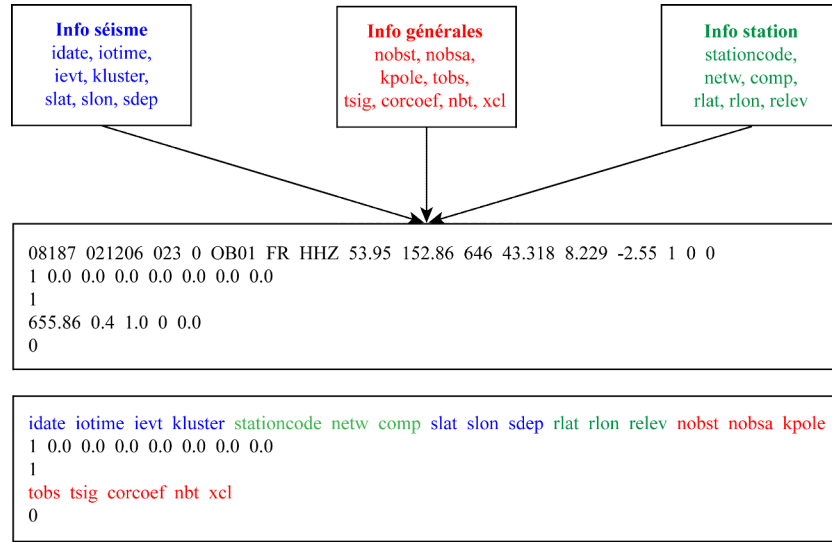


FIGURE E.3 – Exemple de fichier structuré pour l’inversion. **idate** : date du séisme sous le format année et jour julien. Par exemple, pour le séisme du 5 juillet 2008 à 02 : 12 : 06, pris comme exemple dans la procédure de lecture de phase de GROSMarin, nous obtenons 08187. **iotime** : heure du séisme au format heure minute seconde. Par exemple 021206 pour 02 : 12 : 06. **ievt** : le numéro attribué de l’événement dans le catalogue, ici 24. **kluster** : numéro du cluster utilisé pour l’événement, dans notre cas 0. **slat** : latitude du séisme, ici 54,12°. **slon** : longitude du séisme, ici 153,37°. **sdep** : profondeur du séisme, ici 611 km. **nobs** : nombre de lignes contenant des temps de trajet, dans notre cas 1. **nobsa** : nombre de lignes d’amplitude, dans notre cas 0. **kpole** : 0 dans le cas d’une onde qui n’a pas encore fait le tour de la Terre. **tobs** : temps de trajet du séisme à la station en secondes. Par exemple 646,25 s à l’arrivée à l’OBS4. **tsig** : erreur standard en secondes, dans notre cas fixée entre 0,4 et 0,6 s. **corcoef** : coefficient de corrélation, ici 1. **nbt** : nombre de bandes spectrales, ici 0. **xcl** : longueur de la fenêtre, ici 0. **stationcode** : code de la station, par exemple OB04 pour l’OBS 4. **netw** : réseau auquel appartient la station, par exemple FR. **comp** : composante du sismomètre ayant enregistré le séisme, majoritairement verticale dans notre cas (HHZ). **rlat** : latitude de la station ayant enregistré le séisme, ici 43,63°. **rlon** : longitude de la station ayant enregistré le séisme, ici 8,11°. **relev** : élévation ou profondeur de la station ayant enregistré le séisme, ici - 2,44 km.

sont nécessaires. Une fois le programme «*raydata2.f90*» lancé, il est nécessaire de spécifier le modèle utilisé (dans notre cas IASP91), le type d’onde considérée (ici *P*) et le nom du fichier contenant les données («*Data*»). Ces informations sont regroupées dans le fichier «*inclR*». En sortie du programme «*raydata2.f90*», nous obtenons une matrice «*raydata.Data*» contenant les informations sur les temps des lectures des ondes *P* et les corrections associées de croûte et d’ellipticité du modèle **CRUST2.0**.

Etape 3 : création de la matrice de paramétrisation et discrétisation de la Terre (*voxel-matrix.f90* dans figure E.1)

Le programme «*voxelmatrix.f90*» permet de créer la matrice de paramétrisation **A** contenant la discrétisation de la Terre en voxels et les corrections prises en compte à l’étape précédente. Le programme requiert les données et le pas de discrétisation souhaité (soit 10 km dans notre cas). Le

maillage de la Terre est effectué à partir de la PSG³. En sortie, le programme retourne la matrice «*matrix.T.Data*» contenant les temps de trajets ainsi qu'un fichier de statistiques des distances épicentrales «*histo.xy.Data*».

Etape 4 : compression matricielle (*clustermatrix.f90* dans figure E.1)

Le programme «*clustermatrix.f90*», adapté par [Voronin et al., 2014](#), permet d'optimiser les temps de calculs en réduisant la taille des matrices. Le programme requiert comme paramètres d'entrées, les nombres de secondes autorisés pour la correction de l'épicentre et du temps d'origine du séisme (soient respectivement 20 et 3 s), ainsi que la matrice «*matrix.T.Data*». En sortie, le programme retourne les matrices «*cluster*» et «*clstaux*» ainsi que les fichiers d'informations «*diagnostics.clustermatrix*» et «*out.clustermatrix*».

Etape 5 : création de la matrice de régularisation (*dampmatrix.f90* dans figure E.1)

La matrice de régularisation est créée par le programme «*dampmatrix.f90*». Celui-ci permet de définir les paramètres d'amortissement utilisés, la profondeur jusqu'à laquelle il peut être appliqué ainsi que son ordre de relaxation. Enfin, il est possible de définir la latitude, la longitude et le rayon d'une demi-sphère centrée sur la zone d'étude, au-delà de laquelle un amortissement différent peut être affecté. Par exemple, au-delà du point de 43°N 7°E et de rayon 600 km, l'amortissement est dix fois plus important que celui dans la demi-sphère d'étude. En sortie, le programme retourne la matrice de régularisation «*regularisationmatrix*».

Etape 6 : inversion tomographique (*clustertomo.f90* dans figure E.1)

L'inversion tomographique est réalisée suivant la méthode des moindres carrés ([Paige et Saunders, 1982](#)) par le programme «*clustertomo.f90*». Le programme prend en paramètres d'entrées le nombre d'itérations autorisé (ici de 50 à 250), la valeur du χ^2 souhaité ainsi que les valeurs de l'amortissement et du lissage (par exemple 0,1 et 0,9). Le programme renvoie les solutions «*sol.oX.dlnVp.testX*» ainsi que le fichier de fonctionnement du programme «*diagnostics.clusteromo*».

3. Princeton Standard Grid

Symboles

a	Immersion	m
a	Plus grande dimension d'un transducteur	m
a	Largueur, longueur, rayon	m
A, A_0	Amplitude	counts
$A_{constructeur}$	Amplitude	dB
$A_{modélisé}$	Amplitude	dB
A	Facteur d'amplification	
\mathbf{A}	Matrice de paramétrisation	
b	Rayon	m
B, B_g, B_s, b_g, b_s	Directivité, en site et en gisement	
B	Paramètre pour la détermination des pôles et zéros	
c	Célérité de l'eau	1430 m/s
c	Rigidité	N/m ² ou Pa
c_f, c	Célérité	m/s
C	Capacité	F
C_M, C_t	Elasticité	Pa
d	Constance diélectrique	C/N ou m/F
d_{jk}	Constance d'un transducteur	
d, d_i, d_o, d_m, D	Diamètre, interne, externe, moyen	m
D_m	Diamètre, interne, externe, moyen	m
d, d_1, d_2, d_3, d_{hp}	Distance	m ou in
d_{hs}, D	Distance	m ou in
\mathbf{d}	Matrice	
dS	Portion de rai sismique	m
D	Amortissement	
D_{max}	Déplacement	m
D	Induction électrique	C/m ²
e	Constance diélectrique	C/m ²

Symboles

E	Champ électrique	V/m
E	Excentricité	in
E	Module d'Young	Pa
f, f_{min}, f_{max}	Fréquence	Hz
$f_r, f_{rb}, f_{re}, f_{rl}, f_{rr}$	Fréquence de résonance	Hz
$f_{théo}, f_{obs}, f_{mod}$	Fréquence de résonance	Hz
g	Accélération de la pesanteur	m/s^2
g	Constance diélectrique	m^2/C
g_{obs}	Signal observé	counts ou V/1000 Pa
g_{opt}	Signal optimisé	counts ou V/1000 Pa
$G_{20}, G_{37,5}$	Gain	
h	Constante diélectrique	N/C ou V/m
h, H	Hauteur	m
H_0, H_e	Amplitude	m
i	Nombre complexe	$\sqrt{-1}$
I, I_{max}	Intensité	W/m^2
I_p	Intensité	A
j	Nombre complexe	$\sqrt{-1}$
J_0, J_1	Fonction de Bessel	
k	Facteur de couplage	
k	Nombre d'onde	rad/m
K	Constante d'un transducteur	
K_0	Coefficient de majoration	
K_3^T, K_{33}^T	Constante diélectrique	
l, L	Largueur, longueur, hauteur	m
L	Fonction de Laplace	
m	Modèle de vitesse	
m	Moyenne	
m_b, m_w	Magnitude	
n, N	Nombre d'échantillons	
n_p, n_z	Nombre de pôles et de zéros	
N_{BK}, N_{h1}, N_{h2}	Niveau	dB
N_{h3}, N_{h4}	Niveau	dB
$N_{constructeur}$	Niveau	dB V/ μ Pa ou dB μ Pa/V
$N_{modélisé}$	Niveau	dB V/ μ Pa ou dB μ Pa/V
N_1	Constante de fréquence « transversale »	Hz m ou kHz in

N_t	Constante de fréquence « épaisseur »	Hz m ou kHz in
N_r	Constante de fréquence « radiale »	Hz m ou kHz in
N_c, N_{3c}	Constante de fréquence « circonférentielle »	Hz m ou kHz in
N_{3l}	Constante de fréquence « parallèle, longitudinale »	Hz m ou kHz in
N_s	Constante de fréquence « épaisseur »	Hz m ou kHz in
N_{sp}	Constante de fréquence « sphère creuse »	Hz m ou kHz in
N_{3w}	Constante de fréquence « parallèle, épaisseur »	Hz m ou kHz in
p	Pôle	
p, P, p_0	Pression	Pa
P_0	Amplitude	Pa
$P_{MERMAID}$	Immersion	m
P	Polarisation	C/m ²
P_{sol}	Bathymétrie	m
Q	Facteur de qualité mécanique	
$Q(\Delta)$	Facteur de correction d'un séisme	
r, R	Rayon	m
S	Lissage	
s	Souplesse	m ² /N
s	Variable complexe	iω
S	Déformation	m/m
S	Salinité	g/kg
$S_h, S_{H1}, S_{H2}, S_{BK}$	Sensibilité à la réception	dB V/μPa à 1 m
$S_{h1}, S_{h2}, S_{h3}, S_{h4}$	Sensibilité à la réception	dB V/μPa à 1 m
S_I	Sensibilité en intensité à l'émission	μPa / A
S_v, S_T	Sensibilité à l'émission	dB μPa/V à 1 m
S_a	Sensibilité à l'émission d'un accéléromètre	dB s ² V/m
t	Epaisseur	m
$t, t_0, t_1, t_2, t_{eau}$	Temps	s
t_B, t_H, t_τ	Temps	s
T	Contrainte	N/m ²
T	Température	°C
T^{obs}, T^{mod}, T_{sr}	Temps de trajet	s
u, u_z	Déplacement	m
u	Vitesse de déplacement	m/s
u, U, U_c, U_T, U_h	Tension	V
U_{PH}, U_{PH1}, U_{PH2}	Tension	V

Symboles

U_H	Tension	V
v, V, V_0	Vitesse	m/s
V_0, V_f	Volume	m ³
V_0	Vitesse de propagation d'une onde	m/s
V_D	Variation de volume	m ³
V_{max}	Tension	V
V_p	Vitesse des ondes P	8,1 m/s
w	Largeur	m
x	Position	m
x_0	Amplitude de déplacement	m
\ddot{x}	Accélération	m/s ²
Y_0, Y_1	Fonction de Bessel	
z	Zéro	
z	Distance, profondeur	m
$Z, Z_{PH}, Z_{PT}, Z_{TH}$	Impédance	Ω
α	Facteur d'amortissement	
α	Facteur de la relaxation exponentielle	s ⁻¹
β	Constante d'imperméabilité	m/F
β	Facteur de lissage	
β	Rapport	
δt	Résidu de temps de trajet	s
Δd	Distance	m
Δh	Hauteur	m
$\Delta P_h, \Delta P$	Variation de pression	Pa
$\Delta t, \Delta t_{eau}$	Différence de temps de trajet	s
$\Delta U, \Delta U_c$	Variation de tension	V
ϵ	Permittivité électrique	F/m
ϵ_0	Permittivité du vide	$8,8541 \times 10^{-12}$ F/m
γ	Rapport de chaleur spécifique	
γ	Amortissement	
λ	Longueur d'onde	m
ω	Fréquence angulaire	rad/s
ω_r	Fréquence de résonance	rad/s ou Hz
ϕ	Angle	°
ρ, ρ_f	Densité	

ρ, ρ_ω	Masse volumique	kg/m ³
σ	Coefficient de poisson	
σ	Ecart-type	s
σ	Paramètre de la tendance d'une courbe	
τ	Temps, durée	s
θ	Angle	° ou rad
φ	Angle entre l'axe x et le projeté de r	rad
φ	Masse volumique	kg/m ³

Liste des figures

1	Carte des positions des flotteurs du projet ARGO (au 23/07/2015)	2
2	Flotteurs SOLO, Provor et Ninja	3
3	Flotteur APEX-MERMAID	3
4	Hydrophone Rafos II et carte électronique du flotteur MERMAID	4
5	Plongée type du flotteur MERMAID	5
6	Exemples de signaux et de scalogrammes acquis durant la campagne GROSMarin . .	6
7	Détections et fausses détections des signaux acquis durant GROSMarin	7
8	Flotteur Multi-MERMAID	8
9	Les domaines utilisant des hydrophones et les calibrations associées	9
1.1	Principe de la piézoélectricité	18
1.2	Principe de la piézoélectricité appliqué au Quartz	19
1.3	Les classes cristallographiques	19
1.4	Phénomène de la ferroélectricité	20
1.5	Exemples de matériaux piézoélectriques	20
1.6	Matériaux en fonction de leurs masses volumiques et modules d'Young	21
1.7	Etapes de la fabrication de céramiques	22
1.8	Courbes des sensibilités des transducteurs	26
1.9	Polarisations et fermetures de céramiques tubulaires	27
1.10	Principales formes de céramiques et leurs résonances associées	31
1.11	Repère utilisé pour la fonction de directivité	32
1.12	Diagramme polaire type de la directivité d'un projecteur	33
1.13	Directivité et sensibilité de l'hydrophone Bruël & Kjaer 8103	33
1.14	Types d'hydrophone en fonction de l'immersion.	36
1.15	Hydrophone Rafos	36
1.16	Hydrophone OAS-E2PD	37
1.17	Hydrophone HTI-04-PCA/ULF	38
1.18	Inventaire des hydrophones présents sur le marché	40

1.19	Hydrophone développé par Kuester, 1961	41
1.20	Hydrophone développé par Cini et Meyers, 1979	42
1.21	Hydrophone développé par Mott et Pittsburgh, 1980	42
1.22	Hydrophone développé par Regnault, 1987	43
1.23	Conditions aux limites utilisées pour l'étude de la composition des céramiques	46
1.24	Déplacement maximal d'une céramique PZT-7A suite à une contrainte de 1000 Pa	48
1.25	Conditions aux limites utilisées pour l'étude de la sensibilité à l'émission	49
1.26	Courbes de la sensibilité à l'émission, $S_v(1)$	50
1.27	Courbes de la sensibilité à l'émission, $S_v(2)$	51
1.28	Courbes de la sensibilité à la réception, $S_h(1)$	52
1.29	Courbes de la sensibilité à la réception de l'OAS-E2PD	53
1.30	Courbes de la sensibilité à la réception du Rafos I	54
1.31	Directivité de l'hydrophone OAS-E2PD à 1 kHz	55
1.32	Plaquette de l'hydrophone proposé	61
1.33	Assemblage de l'hydrophone proposé	62
2.1	Les domaines utilisant des hydrophones et les calibrations associées	73
2.2	Dimensionnement d'une cuve de calibration pour les hautes fréquences	75
2.3	Méthode de calibration par réciprocité en champ libre	78
2.4	Méthode de calibration en chambre anéchoïque (B&K)	79
2.5	Méthode de calibration par excitation hydrostatique	82
2.6	Méthode de calibration par axe pivotant	83
2.7	Méthode de calibration par réciprocité du coupleur acoustique	84
2.8	Méthode de calibration par déplacement vertical	85
2.9	Méthode de calibration par compensation piézoélectrique	86
2.10	Méthode de calibration par pistonphone	87
2.11	Méthode de calibration par colonne vibrante	89
2.12	Photographie de l'hydrophone Rafos II	91
2.13	Sensibilité de l'hydrophone Rafos II	92
2.14	Principe expérimental de calibration développé en Master	93
2.15	Principe expérimental de calibration développé en Thèse	93
2.16	Principe mécanique de la méthode de calibration «dynamique»	94
2.17	Réponse de l'hydrophone Rafos I à une fonction de Heaviside	95
2.18	Fonction mathématique de Heaviside	96
2.19	Etapes de l'optimisation du signal de sortie de l'hydrophone Rafos I	99
2.20	Histogrammes des paramètres A , α et τ de la réponse du Rafos I	100
2.21	Principe expérimental de la méthode de calibration statique	104

2.22	Exemple d'enregistrement du second capteur de pression de la méthode statique . .	105
2.23	Photos du second capteur de pression et de la carte électronique	105
2.24	Schéma d'un système d'étude pour la détermination des pôles et zéros	107
2.25	Exemple de graphique des pôles et zéros d'un système	109
2.26	Tableau récapitulant les fonctions de Dirac, de Heaviside et rampe	111
2.27	Graphique illustrant les amortissements critique et pseudopériodique	112
2.28	Organigramme du programme «polezero»	114
2.29	Résultats du programme «polezero» pour le cas pseudopériodique	115
2.30	Graphique des pôles et zéros du système d'étude	116
2.31	Enregistrements du séisme de Barcelonnette par les MERMAID (07/04/2014)	117
2.32	Enregistrements corrigés des flotteurs MERMAID lors du séisme de Barcelonnette .	118
2.33	Enregistrements corrigés des flotteurs MERMAID lors du séisme d'Hokkaido	121
3.1	Carte de la Méditerranée	132
3.2	Evolution géodynamique du bassin Ligure	133
3.3	Carte géologique du bassin Ligure	135
3.4	Carte de la sismicité du bassin Ligure	136
3.5	Carte des positions des stations du réseau d'étude	138
3.6	Carte de la répartition, à échelle globale, des séismes	139
3.7	Carte de la répartition, à échelle locale, des séismes	140
3.8	Plan de positionnement des OBS de la campagne GROSMarin	142
3.9	Type d'OBS utilisés durant la campagne GROSMarin	143
3.10	Sismogrammes de l'OBS n°4 du séisme d'Okhotsk (05/07/2008)	145
3.11	Sismogrammes du séisme d'Okhotsk par 12 OBS (05/07/2008)	145
3.12	Carte de couverture des séismes durant GROSMarin	146
3.13	Photographies des sismomètres des stations CORF et EILF	147
3.14	Sismogrammes du séisme du Nicaragua (11/04/2014)	148
3.15	Carte de couverture des séismes des stations françaises	149
3.16	Sismogrammes du séisme de l'océan Atlantique nord (18/02/2014)	150
3.17	Carte de couverture des séismes des stations italiennes	151
3.18	Sismogrammes du séisme de Barcelonnette (07/04/2014)	152
3.19	Sismogrammes du séisme des îles Rat (23/06/2014)	153
3.20	Carte des trajectoires des flotteurs MERMAID	155
3.21	Carte de la dérive de surface des flotteurs MERMAID	156
3.22	Carte bathymétrique et positions des flotteurs lors d'un séisme	158
3.23	Carte bathymétrique et positions des flotteurs en 3D lors d'un séisme	158
3.24	Sismogrammes du séisme de la Grèce (29/08/2014)	161

3.25	Carte d'interpolation des trajectoires des flotteurs en profondeur	163
3.26	Carte de couverture des séismes des flotteurs MERMAID	164
3.27	Les étapes de l'inversion tomographique	168
3.28	Schéma de la demi-sphère définissant la zone d'étude	169
3.29	Etude de l'amortissement des données en-dehors de la zone d'étude	171
3.30	Etude de l'influence du rayon de la demi-sphère de la zone d'étude	172
3.31	Etude des paramètres d'amortissement et de lissage dans la demi-sphère d'étude	173
3.32	Tests de résolution en damier	175
3.33	Tests de résolution en damier pour 2×2 voxels	177
3.34	Comparaison des damiers et solutions en fonction du type de données	178
3.35	Solutions des tests de résolution en damier en profondeur (1)	179
3.36	Solutions des tests de résolution en damier en profondeur (2)	180
3.37	Solutions des tests de résolution en damier en coupe	181
3.38	Tests de résolution en sphère de Gauss	183
3.39	Histogrammes des résidus des temps de trajets	184
3.40	Travaux de Piromallo et Morelli, 2003	185
3.41	Travaux de Spakman et Wortel, 2004	186
3.42	Solutions de l'inversion à 34, 68, 135, 226, 316, 384, 429 et 497 km	187
3.43	Solutions de l'inversion à 135 et 226 km	188
3.44	Solutions de l'inversion en coupe	190
3.45	Solution de l'inversion pour la coupe B'B	191
3.46	Zone de Fresnel et étude de la résolution des cartes bathymétriques	194
A.1	Support de l'hydrophone proposé	205
D.1	Organigramme du programme «polezero»	222
D.2	Résultats du programme «polezero» pour le cas pseudopériodique	224
D.3	Graphique des pôles et zéros du système d'étude	226
E.1	Les étapes de l'inversion tomographique	230
E.2	Modèle de vitesses IASP91	231
E.3	Exemple de fichier «data» structuré pour l'inversion	232

Liste des tableaux

1.1	Les grandeurs de la piézoélectricité	23
1.2	Fréquences de résonance en fonction des formes des céramiques	30
1.3	Principales caractéristiques des céramiques de composition PZT	47
1.4	Résultats de l'étude de la composition des céramiques	48
1.5	Six céramiques du fournisseur STEMiNC	58
1.6	Estimation du coût de l'hydrophone proposé	60
1.7	Les niveaux de maturité technologique	60
1.8	Tableau conclusion sur l'hydrophone proposé	65
2.1	Caractéristiques des méthodes de calibration d'hydrophone à basses fréquences	81
2.2	Caractéristiques des hydrophones Rafos I et II	91
2.3	Protocole de mesures de la méthode de calibration dynamique	95
2.4	Protocole de mesures de la méthode de calibration statique	106
2.5	Comparaison des deux méthodes de calibration développées	124
3.1	Répartition des évènements étudiés en fonction du type de station	137
3.2	Recoupements des séismes étudiés en fonction des réseaux	140
3.3	Positions et type d'OBS de la campagne GROSMarin	141
3.4	Procédure de sélection des séismes de la campagne GROSMarin	144
3.5	Positions des stations terrestres françaises	147
3.6	Positions des stations terrestres italiennes	150
3.7	Dates des déploiements et récupérations des flotteurs MERMAID	152
3.8	Seuils des tolérances du pré-traitement des données MERMAID	159
3.9	Répartition des remontées automatiques des flotteurs	160
3.10	Avantages et inconvénients des flotteurs MERMAID	193

Bibliographie

- Aide Mémoire d'Acoustique sous-marine* (Marine National, Laboratoire D.S.M du Brusc, 1968).
- AFNOR (2007). «Nf en 60565». *Rap. tech.*, Association Française de Normalisation, www.afnor.org.
- Ashby, M. F., Messler, R. W., Asthana, R., Furlani, E. P., Smallman, R. E., Ngan, A. H. W., Crawford, R. J. et Mills, N., *Engineering Materials & Processes Desk Reference* (Elsevier, 2009).
- Bassin, C., Laske, G. et Masters, G. (2000). «The current limits of resolution for surface wave tomography in north america». *EOS, Trans. Am. Geophys*, **81**(F897).
- Becker, J. J., Sandwel, D. T., Smith, W. H. F., Braud, J., Binder, B., Depner, J., Fabre, D., Factor, J., Ingalls, S., Kim, S.-H., Ladner, R., Marks, K., Nelson, S., Pharaoh, A., Trimmer, R., Von Rosenberg, J., Wallace, G. et Weatherall, P. (2009). «Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution : Srtm30 plus». *Marine Geodesy*, **32**(4), p. 355–371.
- Benarrous, E. (1981). «Appareil hydrophone pour effectuer des mesures acoustiques dans un liquide». *Demande de brevet : 81 22 452*, METRAFLU.
- Béthoux, J.-P., Prieur, L. et Bong, J.-H. (1988). «Le courant ligure au large de nice». *Oceanologica Acta*, (p. 59–67).
- Bézier, P. (1977). *Essai de définition des courbes et surfaces expérimentales : contribution à l'étude des propriétés des courbes et des surfaces paramétriques polynomiales à coefficient vectoriels*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
- Bézier, P., *Courbes et surfaces pour la CFAO* (Hermès, 1987).
- Bobber, R. J. (1966). «General reciprocity parameter». *J. Acoust. Soc. Am.*, **39**, p. 680.
- Bobber, R. J., *Underwater Electroacoustic Measurements* (Naval Research Laboratory, 1970).
- Bobber, R. J., *Underwater Electroacoustic Measurements* (Peninsula Press, Los Altos, 1988).
- Bormann, P., *New Manual of Seismological Observatory Practice* (GeoForschungsZentrum,, 2002), 2^e éd.

- Boschi, L. et Dziewonski, A. M. (1999). «High- and low-resolution images of the earth's mantle : Implications of different approaches to tomographic modeling». *J. Geophys. Res.*, **104**(25), p. 567–594.
- Brandt, O. (1958). «Etalonnage d'hydrophones aux fréquences infrasonores». *Acustica*, **8**, p. 31.
- Brissaud, M., *Matériaux piézoélectriques* (Presses Polytechniques et universitaires romandes, 2007).
- Buogo, S., Calicchia, P., Belleggia, A. et Cannelli, G. B., «A hydrophone calibration center for the mediterranean area». Dans : «Acoustics», (p. 4795–4798) (2008).
- Carminati, E., Doglioni, C., Gelabert, B., Panza, G. F., Raykova, R. B., Roca, E., Sabat, F. et Scrocca, D. (2012). «Evolution of the western mediterranean». *Bally A.W. & Roberts D.*
- Cartensen, E. L. (1947). «Self-reciprocity calibration of electroacoustic transducers». *J. Acoust. Soc. Am.*, **19**, p. 961.
- Choqueuse, D. (2012). *Etude expérimentale et analyse du comportement de mousses syntactiques pour grande profondeur d'immersion*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté.
- Cini, H. J. et Meyers, T. J. (1979). «Low frequency hydrophone». *Patent : 4 178 577*, The United States of America.
- Dalton, R. (2002). «Oceanography : Voyage of the argonauts». *Nature*, **415**(6875), p. 954–955.
- Dessa, J. X. (2009). «Campagne grosmarin : rapport de mission». *Rap. tech.*, Géoazur.
- Dessa, J.-X., Simon, S., Lelievre, M., Beslier, M.-O., Deschamps, A., Bethoux, N., Solarino, S., Sage, F., Eva, E., Ferretti, G., Bellier, O. et Eva, C. (2011). «The grosmarin experiment : three dimensional crustal structure of the north ligurian margin from refraction tomography and preliminary analysis of microseismic measurements». *Bull. Soc. géol. France*, **182**(4), p. 305–321.
- Di Stefano, R., Kissling, E., Chiarabba, C., Amato, A. et Giardini, D. (2009). «Shallow subduction beneath italy : Three-dimensionnal images of the adriatic-european-tyrrhenian lithosphere system based on high-quality p wave arrival times». *J. Geophys. Res.*, **114**(B05305).
- Diehl, T., Husen, S., Kissling, E. et Deichmann, N. (2009). «High-resolution 3-d p-wave model of the alpine crust». *Geophys. J. Int.*, **179**, p. 1133–1147.
- Dziewonski, A. M. et Anderson, D. L. (1981). «Preliminary reference earth model (prem)». *Phys. Earth Planet. Inter.*, **25**, p. 297–356.
- Dziewonski, A. M., Hales, A. L. et Lapwood, E. (1974). «Parametrically simple earth models consistent with geophysical data». *Phys. Earth Planet. Inter.*, **10**, p. 12–48.

- Ebaugh, P. et Mueser, R. E. (1947). «The practical application of the reciprocity theorem in the calibration of underwater sound transducers». *J. Acoust. Soc. Am.*, **19**, p. 695.
- Embleton, T. (2011). *Methodologie for the Design of hydrophone Acoustic Baffles and Supporting Materials*. Thèse de doctorat, University of Texas at Austin.
- Eva, E., Solarino, S. et Spallarossa, D. (2001). «Seismicity and crustal structure beneath the western ligurian sea derived from local earthquake tomography». *Tectonophysics*, **399**, p. 495–510.
- Faccenna, C., Becker, T. W., Lucente, F. P., Jolivet, L. et Rossetti, F. (2001a). «History of subduction and back-arc extension in the central mediterranean». *Geophys. J. Int.*, **145**, p. 809–820.
- Faccenna, C., Funiciello, F., Giardini, D. et Lucente, P. (2001b). «Episodic back-arc extension during restricted mantle convection in the central mediterranean». *EPSL*, **187**, p. 105–116.
- Faccenna, C., Piromallo, C., Crespo-Blanc, A., Jolivet, L. et Rossetti, F. (2004). «Lateral slab deformation and the origin of the western mediterranean arcs». *Tectonics*, **23**(TC1012).
- Foldy, L. L. et Primakoff, H. (1945). «General theory of passe linear electro-acoustic transducers and the electro-acoustics reciprocity theorem». *J. Acoust. Soc. Am.*, **17**, p. 109.
- Gattaccecca, J., Deino, A., Rizzo, R., Jones, D. S., Henry, B., Beaudouin, B. et Vadeboin, F. (2007). «Miocene rotation of sardinia : New paleomagnetic and geochronological constraints and geodynamic implications». *EPSL*, **258**, p. 359–377.
- Goes, S., Giardini, D., Jenny, S., Hollenstein, C., Khale, H.-G. et Geiger, A. (2004). «A recent tectonic reorganization in the south-central mediterranean». *EPSL*, **226**, p. 335–345.
- Golenkov, A. N. (1972). *Method of calibration infrasonic hydrophones*. Army Foreign Science and Technology Center, Charlottesville, Virginia, patent : ad 770 520 éd.
- Golenkov, A. N. et Likhachev, S. M. (1994). «Features of the calibration of hydrophones in the nonuniform field of measuring chambers». *Measurement Techniques*, **37**(11), p. 1301–1306.
- Golenkov, A. N. et Pavlov, L. E. (1967). «Absolute calibration of measuring hydrophones in the audio-frequency range». *Measurement Techniques*, **5**, p. 44–49.
- Golenkov, A. N. et Pavlov, L. E. (1969). «A facility for the calibration of hydrophones by the reciprocity method in a free field a facility for the calibration of hydrophones by the reciprocity method in a free field a facility for the calibration of hydrophones by the reciprocity method in a free field». *Measurement Techniques*, **12**, p. 109.

- Gorini, C., Lofi, J., Duvail, C., Dos Reis, A. T., Guennoc, P., Lestrat, P. et Mauffret, A. (2005). «The late messinian salinity crisis and late miocene tectonism : Interaction and consequences on the physiography and post-rift evolution of the gulf of lions margin». *Marine and Petroleum Geology*, **22**, p. 695–712.
- Gould, J. (2004). «Argo profiling floats bring new era of in situ ocean observations». *Eos Trans. AGU*, **85**(19), p. 185–191.
- Gueguen, E., Doglioni, C. et Fernandez, M. (1998). «On the post-25 ma geodynamic evolution of the western mediterranean». *Tectonophysics*, **298**, p. 259–269.
- Guiffard, B. (1999). *Elaboration et caractérisation de céramiques ferroelectriques de type PZT Fluore*. Thèse de doctorat, Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité INSA Lyon.
- Hajjaji, A. (2007). *Caractérisation multi-échelle et lois de comportement dans les matériaux ferro-électriques*. Thèse de doctorat, Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité INSA Lyon.
- Heaviside, O., *The Heaviside centenary volume* (Institution of Electronical Engineers, 1950).
- Henri, L. (1985). «Hydrophone fonctionnant en hydrostatique». *Demande de brevet : 2 709 395*, Thomson-CSF.
- Jolivet, L., Augier, R., Faccenna, C., Negro, F., Rimmelé, G., Agard, P., Robin, C., Rossetti, F. et Crespo-Blanc, A. (2008a). «Subduction, convergence and the mode of backarc extension in the mediterranean region». *Bull. Soc. géol. Fr*, **179**(6), p. 525–550.
- Jolivet, L., Augier, R., Robin, C., Suc, J.-P. et Rouchy, J.-M. (2006). «Lithospheric-scale geodynamic context of the messinian salinity crisis». *Sedimentary Geology*, (p. 9–33).
- Jolivet, L., Brun, J.-P., Meyer, B., Prouteau, G., Rouchy, J.-M. et Scaillet, B., *Géodynamique Méditerranéenne*. ISBN : 978-2-7117-4071-0 (Vuibert, 2008b).
- Jolivet, L. et Faccenna, C. (2000). «Mediterranean extension and the africa-eurasia collision». *Tectonics*, **9**(6), p. 1095–1106.
- Joubert, C. (2011). *Développement d'une méthode de calibration d'hydrophones à basses fréquences (< 2 Hz) : Application à l'hydrophone Rafos utilisé dans le cadre du projet GLOBALSEIS*. Thèse de maître, Université Pierre et Marie Curie.
- Kennett, B. L. N. et Engdahl, E. R. (1991). «Traveltimes for global earthquake location and phase identification». *Geophys. J. Int.*, **105**(2), p. 429–465.

- Kennett, B. L. N., Engdahl, E. R. et Buland, R. (1995). «Constraints on seismic velocities in the earth from traveltimes». *Geophys. J. Int.*, **122**(1), p. 108–124.
- Kikuchi, Y., *Ultrasonic transducers* (Tohoku University Electronics Series, 1969).
- Koch, C. et Wilkens, V., «Phase calibration of hydrophones : Heterodyne time-delay spectrometry and broadband pulse technique using an optical phase calibration of hydrophons : Heterodyne time-delay spectrometry and broadband pulse technique using an optical reference hydrophone». Dans : I. of Physics Publishing (Réd.), «Journal of Physics», , *Conference Series 1*, t. 1(p. 14–19) (doi :10.1088/1742-6596/1/1/006, 2004).
- Kuester, D. W. (1961). «Low frequency hydrophone». *Patent : 3 002 179*, United States Patent.
- Lagier, M., Gragnolati, C. et Bescombes, J.-P. (1992). «Low-frequency hydrophone and sonar array including such hydrophones». *Brevet : 5 144 597*, Thomson-CSF.
- Leblanc, C. L., *Handbook of hydrophone element design technology* (Naval Electronic Systems Center, 1981).
- Levin, P. A. (1973). «Technical review». *Rap. tech.*, Bruël & Kjaer, [http ://www.bksv.com/doc/TechnicalReview1973-1.pdf](http://www.bksv.com/doc/TechnicalReview1973-1.pdf).
- Lippitsch, R., Kissling, E. et Ansorge, J. (2003). «Upper mantle structure beneath the alpine orogen from high-resolution teleseismic tomography». *J. Geophys. Res.*, **108**(B8), p. 2376.
- Malinverno, A. et Ryan, W. B. (1986). «Extension in the tyrrhenian sea and shortening in the appennines as a result of the arc migration driven by sinking of the lithosphere.» *Tectonics*, **5**, p. 227–246.
- Mankins, J. C. (1995). «Technology readiness levels». *Rap. tech.*, NASA.
- Marage, J.-P. et Mori, Y., *Sonars et acoustique sous-marine, Le milieu marin, l'interface acoustique électrique, structures d'antennes*, t. 1 (Lavoisier, 2009).
- Mc Eachern, J. F. (1984). *Very low frequency hydrophone calibration*. United States Patent, patent : 4 441 173 éd.
- McMahon, G. W. (1964). «Coupler-reciprocity system for hydrophone calibration at high pressures». *J. Acoust. Soc. Am.*, **36**(12), p. 2311–2315.
- Mermoz, H. (1958). «Etalonnages par réciprocité en champ libre de transducteurs sousmarins». *Acustica*, **8**, p. 102.

Bibliographie

- Migeon, S., Cattaneo, A., Hassoun, V., Larroque, C., Corradi, N., Fanucci, F., Dano, A., Mercier de Lepinay, B., Sage, F. et Gorini, C. (2011). «Morphology, distribution and origin of recent submarine landslides of the ligurian margin (north-western mediterranean) : some insights into geohazard assessment». *Mar. Geophys. Res.*, **32**(1-2), p. 225– 243.
- Migeon, S. et Larroque, C. (2006). «Rapport de campagne malisar». *Rap. tech.*, Géoazur.
- Migeon, S. et Larroque, C. (2007). «Rapport de campagne malisar 2». *Rap. tech.*, Géoazur.
- Migeon, S. et Larroque, C. (2008). «Rapport de campagne malisar 3». *Rap. tech.*, Géoazur.
- Million, C. (2003). *Contribution à l'étude des procédés de réalisation de structures métal/PZT/métal sur silicium pour microsystèmes piézoélectriques*. Thèse de doctorat, Laboratoire de Physique de la Matière INSA Lyon.
- Millot, C. et Wald, L. (1980). «The effect of mistral wind on the ligurian current near provence». *Oceanologica Acta*, **3**(4), p. 399–402.
- Mott, G. et Pittsburgh, P. (1980). «Low frequency hydrophone». *Patent : 4 188 609*, Westinghouse Electric Corporation.
- Nolet, G. (1985). «Solving or resolving inadequate and noisy tomographic systems». *J. Comput. Phys.*, **61**, p. 463–482.
- Nolet, G., *A Breviary of Seismic Tomography* (Cambridge University Press, UK, 2008).
- Nolet, G. (2009). «Globalseis : Global tomography and geodynamics». *EMSC Newsletter*, **23**, p. 36–37.
- Nystuen, J. A. et Farmer, D. M. (1989). «Précipitation in the canadian atlantic storms program : Measurements of the acoustic signature». *Atmosphere-Ocean*, **27**(1), p. 237–257.
- Oppenheim, A. V., Willsky, A. S. et Young, I. T., *Signals and systems*. Prentice-Hall signal processing series (Prentice-Hall, 1983).
- Paige, C. C. et Saunders, M. A. (1982). «Lsqr : An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares.» *ACM Trans. Math. Software*, **8**, p. 43–71.
- Piromallo, C. et Morelli, A. (2003). «P wave tomography of the manthe under the alpine-mediterranean area». *J. Geophys. Res.*, **108**(B2).
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. et Flannery, B. P., *Numerical Recipes in C. The Art of Scientific Computing* (Cambridge University Press, 1992), 2^e éd.

- Primakoff, H. et Foldy, L. L. (1947). «General theory of passive linear electro-acoustic transducers and the electro-acoustic reciprocity theorem ii». *J. Acoust. Soc. Am.*, (p. 50).
- Radulescu, E. G., Lewin, P. A., Wojcik, A. et Nowicki, A. (2003). «Calibration of ultrasonic hydrophone probes up to 100 mhz using time gating frequency analysis and finite amplitude waves». *Ultrasonics*, **41**, p. 247–254.
- Regnault, A. (1987). «Dispositif hydrophone pour la mesure de pression d’essais en sismique marine». *Brevet : 2 617 284*, Compagnie générale de Géophysique.
- Réhault, J.-P., Boillot, G. et Mauffret, A. (1984). «The western méditerranean basin geological evolution». *Marine Geology*, **55**, p. 447–477.
- Ringler, A. T., Hutt, C. R., Aster, R., Bolton, H., Gee, L. S. et Strom, T. (2012). «Estimating pole-zero errors in gsn-iris/usgs network calibration metadata». *Bull. Seis. Soc. Am.*, **102**(2), p. 836–841.
- Rogers, P. H. (1986). «Mathematical model for a free-flooded piezoelectric cylinder transducer». *J. Acoust. Soc. Am.*, **80**(1), p. 13–18.
- Rollet, N., Déverchère, J., Beslier, M.-O., Guennoc, P., Réhault, J.-P., Sosson, M. et Truffert, C. (2002). «Back arc extension, tectonic inheritance, and volcanism in the ligurian sea, western mediterranean». *Tectonics*, **21**(3).
- Rudaz, J. A. (1982). «Nouvel hydrophone». *Demande de brevet : 2 530 108*, Compagnie générale de Géophysique.
- Sabin, G. A. (1956). «Transducer calibration by impedance measurements». *J. Acoust. Soc. Am.*, **28**, p. 1956.
- Sage, F., Beslier, M.-O., Thinon, L., Larroque, C., Dessa, J. X., Migeons, S., Angelier, J., Guennoc, P., Schreiber, D., Michaud, F., Stephan, J.-F. et Sonnette, L. (2011). «Structure and evolution of a passive margin in a compressive environment : Example of the south-western alpseligurian basin junction during the cenozoic». *Marine and Petroleum Geology*, **28**, p. 1263–1282.
- Scafidi, D. et Solarino, S. (2012). «Can local earthquake tomography settle the matter about subduction in the northern and central apennines ? response from a new high resolution p velocity and vp/vs ratio 3-d model». *Tectonophysics*, (p. 63–73).
- Scherbaum, F., *Of Poles and Zeros*. ISBN 0-7923-6834-7 (Kluwer Academic Publishers, 2001), 2^e éd.

- Schettino, A. et Turco, E. (2006). «Plate kinematics of the western mediterranean region during the oligocene and early miocene». *Geophys. J. Int.*, **166**, p. 1398–1423.
- Schloss, F., County, A. V., M., S. et County, M. M. (1965). *Low frequency hydrophone calibration*. United States Patent, patent : 3 224 246 éd.
- Simons, F. J., Loris, I., Nolet, G., Daubechies, I. C., Voronin, S., Judd, J. S., Vetter, P. A., Charléty, J. et Vonesch, C. (2011). «Solving or resolving global tomographic models with spherical wavelets, and the scale and sparsity of seismic heterogeneity». *Geophys. J. Int.*, **187**, p. 969–988.
- Simons, F. J., Nolet, G., Babcock, J. M., Davis, R. E. et Orcutt, J. A. (2006). «A future for drifting seismic networks». *Eos*, **87**(31), p. 305–307.
- Simons, F. J., Nolet, G., Georgief, P., Babcock, J. M., Regier, L. A. et Davis, R. E. (2009). «On the potential of recording earthquakes for global seismic tomography by low-cost autonomous instruments in the oceans». *J. Geophys. Res.*
- Sims, C. C. et Henriquez, T. A. (1964). «Reciprocity calibration of a standard hydrophone at 16,000 psi». *J. Acoust. Soc. Am.*, **36**(1704).
- Smith, R. A. et Bacon, D. R. (1990). «A multiple-frequency hydrophone calibration technique». *J. Acoust. Soc. Am.*, **87**(5), p. 2231–2243.
- Smith, W. H. F. et Sandwell, D. T. (1997). «Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings». *Sciences*, **277**, p. 1956–1962.
- Spakman, W. et Nolet, G., *Imaging algorithm, accuracy and resolution in delay time tomography*. (Springer Netherlands, 1988).
- Spakman, W. et Wortel, M. J. R., *Tomographic View on Western Mediterranean Geodynamics, in : The TRANSMED Atlas, The Mediterranean Region from Crust to Mantle*, chap. 2, (p. 31–52) (Springer, 2004).
- Speranza, F., Villa, I. M., Sagnotti, L., Florindo, F., Cosentino, D., Cipollari, P. et Mattei, M. (2002). «Age of the corsica-sardinia rotation and liguro-provençal basin spreading : new paleomagnetic and ar/ar evidence». *Tectonophysics*, **347**, p. 231–251.
- Stampfli, G. M. et Borek, G. D., *The TRANSMED transect in space and time : constraints on the paleotectonic evolution of the Mediterranean domain. In : Cavazza et al. (eds) The TRANSMED Atlas - The Mediterranean Region from Crust to Mantle.*, (p. 53–80) (Springer, 2004).
- Stansfield, D., *Underwater Electroacoustic Measurements : A Handbook For Users and Designers* (Peninsula Publishing, 2002).

- Stehly, L., Fry, B., Campillo, M., Shapiro, N. M., Guilbert, J. et Boschi, L. (2009). «Tomography of the alpine region from observations of seismic ambient noise». *Geophys. J. Int.*, **178**, p. 118–350.
- Sukhovich, A., Bonnieux, S., Hello, Y., Irisson, J.-O., Simons, F. J. et Nolet, G. (2015). «Seismic monitoring in the oceans by autonomaux floats». *Submitted to Nature*.
- Sukhovich, A., Irisson, J.-O., Simons, F. J., Ogé, A., Hello, Y., Deschamps, A. et Nolet, G. (2011). «Automatic discrimination of underwater acoustic signals generated by teleseismic p waves : A probabilistic approach». *Geophys. Re. Letters*, **38**(L18605).
- Tetlie, P. J., Brudal, H. N. et Meisingset, A. E. (1987). «Hydrophone piézoélectrique». *Brevet : 2 604 588*, GETECH A/S.
- Trott, W. J. (1968). «International standardization in underwater sound measurements». *Acta Acustica*, **20**(3), p. 169–181.
- Trott, W. J. et Lide, E. N. (1955). «Two-projector null method for calibration of hydrophones at low audia and infrasonic frequencies.» *J. Acoust. Soc. Am.*, **27**(5), p. 951–955.
- Veledar, O. (2009). «Hydrophone-based calibrator for seawater acoustic detection of uhe neutrinos». *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **604**, p. S212–S214.
- Villagómez, D. R., R., T. D., Geist, D. J., Hooft, E. E. E. et Solomen, S. C. (2014). «Mantle flow and multistage melting beneath the galápagos hotspot revealed by seismic imaging». *Nature Geoscience*, **7**, p. 151–156.
- Voronin, S., Mikesell, D., Slezak, I. et Nolet, G. (2014). «Solving large tomographic linear systems : size reduction and error estimation». *Geophys. J. Int.*, **199**, p. 276–285.
- Wessel, P. et Smith, W. H. F. (1991). «Free software helps map and display data». *Eos Trans.*, **72**, p. 441–446.
- Westphal, M., Orsini, J. et Vellutini, P. (1976). «Le microcontinent corso-sarde, sa position initiale : donnees paleomagnetiques et raccords geologiques.» *Tectonophysics*, **30**, p. 141–157.
- Wielandt, E., *Seismic Sensors and their Calibration*. In : Bormann, P. (Ed.), *New Manual of seismological Observatory Practice (NMSOP-2)*, chap. 5, (p. 44) (GFZ German Research Centre for Geosciences, 2012), nmsop-2 éd.
- Wilson, O. B., *Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers* (Peninsula Publishing, 1988).

Bibliographie

- Wüstefeld, A., Bokelmann, G., Zaroli, C. et Barruol, G. (2008). «Splitlab : A shear-wave splitting environment in matlab». *Computers & Geosciences*, **34**, p. 515–528.
- Zalesak, J. F. (1999a). «Considerations for a new high-accuracy transfer-coupler reciprocity system for absolute electro-acoustic calibration». *Metrologia*, **36**, p. 305–311.
- Zalesak, J. F. (1999b). «Transfer coupler reciprocity : A new low-frequency coupler-reciprocity technique for the absolute calibration of field hydrophones under full environmental conditions». *J. Acoust. Soc. Am.*, **105**(4), p. 2342–2349.

